

eingereicht: 29.09.2008  
Tag der mündlichen Prüfung: 11.03.2009



Die Arbeit wurde durch die  
Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)  
im Rahmen des Stipendenschwerpunkts  
"Indikatoren für eine nachhaltige Landnutzung"  
gefördert.



## **Abstrakt**

Die steigende Verknappung der Ressourcen bei stetigem Bevölkerungswachstum und der sich vollziehende Klimawandel erfordern Nachhaltigkeit in allen Ebenen der landwirtschaftlichen Produktion. Ziel dieser Arbeit war es eine allgemein anwendbare Methode zur Energiebilanzierung in der Tierhaltung am Beispiel der Milchviehhaltung zu entwickeln und darauf aufbauend Indikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit des Energieeinsatzes im Milchproduktionsverfahren zu ermitteln.

Anhand eines theoretischen Standardverfahrens der Milchproduktion wird eine Energieintensität von 3,54 MJ zur Herstellung von einem kg Milch bei einer definierten Einzeltierleistung von 8.000 kg Milch Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup> berechnet. Hierbei wird der kumulierte Energieaufwand (KEA) komplett dem Zielprodukt Milch zugeordnet. Stark beeinflussbar ist die Energieintensität durch die Fütterungsgestaltung, wobei beispielsweise ein steigender Kraftfutteranteil in der Ration die Energieintensität erhöht. Die Analyse der Daten von zwei Praxisbetrieben bestätigen die Ergebnisse.

Aufgrund der Kuppelproduktentstehung in der Milchviehhaltung werden unterschiedliche Allokationsmethoden des KEA der Milchproduktion auf die einzelnen Produkte entwickelt und diskutiert. Die ermittelte Vorzugsmethode empfiehlt folgende Allokation des KEA auf die vier Kuppelprodukte: 59 % des KEA wird dem Zielprodukt Milch zugeordnet, 18 % der Schlachtkuh, 2 % dem Kalb und 21 % den Exkrementen.

Die Durchführung einer Fehlerfolgeabschätzung zeigt, dass Einzelunsicherheiten aufgrund der Vielzahl der einfließenden Parameter in der Energiebilanzierung der Milchproduktion nur geringen Einfluss auf den KEA haben. Der Einfluss von Verfahrensänderungen durch betriebs- und managementbedingte Entscheidungen auf den KEA ist bedeutend höher.

Als geeigneter Indikator zur Bewertung der Nachhaltigkeit des Energieeinsatzes in der Tierhaltung wurde die Energieintensität ermittelt. Diskussionswertebereiche für die Energieintensität wurden definiert.

**Schlüsselwörter:** kumulierter Energieaufwand, Energieintensität, Energieeffizienz, Ökobilanzierung, Milchviehhaltung, Allokation, Nachhaltigkeit, Indikator



## **Abstract**

The scarcity of resources, the progressive growth of population and the climate change require sustainability in all levels of the agricultural production. The purpose of this research is to contribute to the development of a method for a generally accepted way of balancing energy in livestock husbandry at the example of dairy farming. Afterwards sustainability indicators were determined for the assessment of the sustainable use of energy in dairy farming.

For a defined standard procedure which includes an animal performance of 8,000 kg milk cow<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, an energy intensity of 3.54 MJ per kg milk is calculated. The investigations show that the CED in dairy farming is strongly affected by the composition of the diet. Increasing pasture in the diet decreases the CED while concentrate in the diet has a reverse effect. Data analyses concerning the energy intensity at two farms confirm the results of the calculations.

Dairy farming is a multi-output process. For that reason the allocation of the cumulative energy demand on the different products is done within the scope of a life cycle inventory analysis. The preferable solution of the allocation divides the cumulative energy demand on the four co-products as follows: 59 % for the milk production, 18 % for producing beef from the dairy cow, 2 % for the calf and 21 % for the excrements.

An uncertainty analysis is done to verify the influence of single uncertainties on the results of the calculations. As result an uncertainty of  $\pm 6$  % of the CED of the standard procedure was calculated. This uncertainty of the calculation has a lower influence on the CED than management related decisions on the cultural practices e. g. diet compositions and service life of the cows.

Energy intensity in livestock husbandry has been determined as an useful indicator and therefore a reasonable part of an indicator system for the examination of the sustainability of agricultural production procedures.

**Keywords:** cumulative energy demand, energy intensity, energy efficiency, dairy, allocation, LCA, sustainability, indicator





Danke!

Mein Dank gilt allen, die mir die Anfertigung dieser Arbeit ermöglicht und mich dabei unterstützt haben.

Besonders danken möchte ich Herrn Dr.-Ing. W. Berg sowie Herrn Prof. Dr. agr. habil. R. Brunsch für die Überlassung des Themas.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Dr.-Ing. W. Berg für die wertvollen fachlichen Hinweise und die hilfreichen Diskussionen sowie für die umfangreiche Betreuung meiner Arbeit.

Sehr hilfreich waren auch die wertvollen Anregungen von Herrn Prof. Dr. agr. habil. R. Brunsch, für die ich ihm besonders danken möchte sowie für die gewährte Unterstützung während der Bearbeitungszeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die finanzielle Unterstützung meiner Arbeit und im Speziellen bei Frau Grimm für die angenehme Betreuung während meines Stipendiums.

Den Landwirten der Untersuchungsbetriebe möchte ich für die Bereitwilligkeit zur Unterstützung und der Beantwortung meiner Fragen danken.

Für die vorhandene Hilfsbereitschaft sowie freundliche Unterstützung während meiner Promotionszeit möchte ich mich bei meinen Kollegen, insbesondere bei Frau Ulrike Seifert, am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB) bedanken.

Letztendlich danke ich besonders Marcel Ullrich und meiner Familie für die Rücksichtnahme und die wertvolle Unterstützung während der gesamten Bearbeitungszeit.



**Inhaltsverzeichnis**

	<u>Seite</u>
Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Übersichtsverzeichnis	XI
1 Einleitung mit Problemstellung und Zielstellung	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik	4
2.1 Nachhaltigkeit der Landwirtschaft	4
2.2 Nachhaltigkeitsindikatoren	6
2.3 Modelle und Bewertungsansätze	12
2.4 Ableitung von Zielwerten zur Einschätzung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme	21
2.5 Energieaufwand in der Tierhaltung	22
2.6 Ökobilanzierung landwirtschaftlicher Systeme	24
2.7 VDI-Richtlinie 4600: Kumulierter Energieaufwand	27
2.8 Grundlagen aus der Tierernährung	28
2.9 Energieaufwand für die Sojaerzeugung und -bereitstellung	30
3 Material und Methoden	32
3.1 Erläuterung und Stand zu REPRO	32
3.2 Systemgrenzen Energiebilanzierung	33
3.3 Definition eines Standardverfahrens für die Milchviehhaltung	37
3.4 Ermittlung des Energieaufwands für die einzelnen Verfahrensabschnitte	40
3.5 Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens unter Einfluss der Re- produktionsrate	44
3.6 Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse	45
3.7 Energieintensität in Abhängigkeit von Verfahrensvarianten	48
3.8 Beschreibung der angewendeten Methoden zur Allokation des kumulier- ten Energieaufwands in der Milchviehhaltung	49
3.8.1 1. Methode: Allokation ausschließlich auf das Zielprodukt	50
3.8.2 2. Methode: Allokation anhand biologisch-physiologischer Beziehungen	50
3.8.3 3. Methode: Allokation auf Grundlage biologisch-physiologischer und verfahrenstechnischer Beziehungen	53
3.9 Energieeffizienz des Standardverfahrens	55
3.10 Energiebilanzierung für die Untersuchungsbetriebe	56
4 Ergebnisse	57
4.1 Ermittlung der Energieintensität des Standardverfahrens	57
4.1.1 Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung	57
4.1.1.1 Energieintensität des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung	61
4.1.1.2 Kumulierter Energieaufwand in Abhängigkeit unterschiedlicher Schnitt- häufigkeit von Grünland zur Grassilageproduktion	62
4.1.1.3 Kumulierter Energieaufwand zur Bereitstellung von Futter beim Anbau von Ackergras	63
4.1.2 Verfahrensabschnitt Milchgewinnung	64

	<u>Seite</u>
4.1.2.1	Milchentzug 64
4.1.2.2	Milchkühlung 66
4.1.2.3	Reinigung und Desinfektion 68
4.1.2.4	Energieintensität des Verfahrensabschnitts Milchgewinnung 69
4.1.3	Verfahrensabschnitt Gebäude und bauliche Anlagen 69
4.1.4	Verfahrensabschnitt Maschinen und technische Ausrüstung 74
4.1.5	Verfahrensabschnitt Nachzucht 76
4.1.5.1	Futterbereitstellung 76
4.1.5.2	Gebäude 77
4.1.5.3	Maschinen und technische Ausrüstung 78
4.1.5.4.	Energieintensität des Verfahrensabschnitts Nachzucht 79
4.1.6	Energieintensität des Standardverfahrens 80
4.2	Energieintensität der Milchproduktion in Abhängigkeit verschiedener Milchleistungen 81
4.3	Energieintensität der Milchproduktion in Abhängigkeit der Reproduktionsrate 82
4.4	Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse 84
4.5	Energieintensität im Milchproduktionsverfahren in Abhängigkeit von Verfahrensvarianten 93
4.6	Allokation des kumulierten Energieaufwandes des Standardverfahrens 95
4.6.1	1. Methode: Vermeidung der Allokation 95
4.6.2	2. Methode: Allokation anhand biologisch-physiologischer Beziehungen im Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung 96
4.6.3	3. Methode: Allokation des kumulierten Energieaufwands des gesamten Verfahrens Milchproduktion auf die Produkte 102
4.7	Indikatorenenermittlung zur Energieintensität in der Milchviehhaltung und Ableitung von Zielwerten zur Einschätzung der Nachhaltigkeit des Milchproduktionsverfahrens 114
4.7.1	Beschreibung von Indikatoren zur Energieintensität in der Milchproduktion am Beispiel des Standardverfahrens 114
4.7.2	Beschreibung des Indikators Energieeffizienz der Milchproduktion am Beispiel des Standardverfahrens 118
4.8	Anwendung der Energiebilanzierungsmethode anhand von Untersuchungsbetrieben 119
4.8.1	Ermittlung der Energieintensität für das Milchproduktionsverfahren am Beispiel des Untersuchungsbetriebs 1 119
4.8.2	Ermittlung der Energieintensität für das Milchproduktionsverfahren am Beispiel des Untersuchungsbetriebs 2 124
4.8.3	Vergleich der Energieintensität der Untersuchungsbetriebe 129
5	Diskussion 132
5.1	Energieaufwand und Energieintensität von Milchproduktionsverfahren 132
5.2	Ergebnisvergleich der Energieintensität zur Milchproduktion zwischen dem theoretischen Standardverfahren und den Untersuchungsbetrieben 134
6	Schlussfolgerungen 139
7	Zusammenfassung 141
8	Summary 144
9	Literaturverzeichnis 147

---

	<u>Seite</u>
10	Anhang 160
10.1	Anhang A - Begriffserklärungen 160
10.2	Anhang B - Abbildungen und Tabellen 167
10.3	Anhang C - Baupläne 196

**Abkürzungsverzeichnis**

Zeichen	Benennung
a	Jahr
AEI	Agro-Ecological-Indicators
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BSP	Bruttosozialprodukt
CSD	Commission on Sustainable Development
DPSIR	Driving Force - Pressure - State - Import - Response
DSR	Driving Force - State - Response
dt	Dezitonne
EMA	Environmental Management for Agriculture
ESI	Environmental Sustainability Index
EU	Europäische Union
FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
FM	Frischmasse
GE	Getreideeinheit
GJ	Gigajoule
GV	Großvieheinheiten
ha	Hektar
KEA	kumulierter Energieaufwand
kg	Kilogramm
KOMM	Kommission der Europäischen Gemeinschaften
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.
KUL	Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanzierung)
MAFF	Ministry of Agriculture, Fisheries and Food/UK
MJ	Megajoule
mm	Millimeter
N	Stickstoff
OECD	Organisation for Economic Co-Operation and Development
PICABUE	Principles-Issues-Construct-Augment-Boundary-Uncertainty-Evaluate
PSR	Pressure - State - Response
REPRO	Reproduktion der organischen Substanz
RR	Reproduktionsrate
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
TM	Trockenmasse
UBA	Umweltbundesamt
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

---

Zeichen	Benennung
vgl.	vergleiche
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung globale Umweltveränderung
WCED	World Commission of Environment and Development
WTO	World Trade Organisation
XF	Rohfaser
XL	Rohfett
XP	Rohprotein
XX	stickstofffreie Extraktstoffe

## Abbildungsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Abbildung 1: Driving-Force-State-Response-(DSR)-Modell (MÜNCHHAUSEN & NIEBERG, 1997)	14
Abbildung 2: Bewertungsmaßstäbe, Kategorien fachlicher Übereinkünfte und rechtlicher Verbindlichkeit (HÜLSBERGEN, 2003)	22
Abbildung 3: Einfluss der Höhe der Futteraufnahme auf die tägliche Methanbildung bzw. die Methanausscheidung in Prozent zur Bruttoenergieaufnahme (Ration 50 % Grassilage, 50 % Kraftfutter; (-) Methan; (---) Methan in % der Bruttoenergie (MILLS ET AL., 2001)	30
Abbildung 4: Vernetzte Stoffflüsse im Modell REPRO (HÜLSBERGEN, 2003)	32
Abbildung 5: Schema der Energieflüsse im Verfahren Milchproduktion	37
Abbildung 6: Milchkuhhaltung nach Bestandsgrößenklassen (Statistische Jahrbücher 1997, 1999, 2005 und 2008)	38
Abbildung 7: Milchviehhaltung in Ställen in Deutschland 2004 (4.282.005 Tiere) (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2004)	39
Abbildung 8: Ernährungsphysiologische Umwandlung der Energie	51
Abbildung 9: Vergleich der Energieintensität unterschiedlicher Futterrationen und Ertragsklassen	60
Abbildung 10: Kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung [MJ]	61
Abbildung 11: Energieintensität für die Futterbereitstellung von Grassilage in Abhängigkeit unterschiedlicher Ernteintensitäten mit einem Feldhäcksler	62
Abbildung 12: Energieintensität der einzelnen Schnitte bei der Futterbereitstellung von Grassilage in Abhängigkeit der Ernteintensität mit einem Feldhäcksler	63
Abbildung 13: Indirekter Energieaufwand von Milchkühltanks	66
Abbildung 14: Kumulierter Energieaufwand für die Milchgewinnung [ $\text{MJ kg}^{-1}$ Milch]	69
Abbildung 15: Kumulierter Energieaufwand unterschiedlicher Stallgebäudetypen für verschiedene Stallfußbodenausführungen	71
Abbildung 16: Kumulierter Energieaufwand der einzelnen Gebäudebestandteile der unterschiedlichen Gebäudetypen mit Spaltenboden	71
Abbildung 17: Kumulierter Energieaufwand für die Grundfutterlagerung pro $\text{m}^3$	72
Abbildung 18: Kumulierter Energieaufwand für unterschiedliche Güllelager	73
Abbildung 19: Kumulierter Energieaufwand für die technische Ausrüstung im Milchproduktionsverfahren [ $\text{MJ Tierplatz}^{-1}$ und $\text{Jahr}^{-1}$ ]	74
Abbildung 20: Kumulierter Energieaufwand für die Maschinen in der Milchviehhaltung	75
Abbildung 21: Kumulierter Energieaufwand der technischen Ausrüstung ( $220 \text{ MJ Tierplatz}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ )	79
Abbildung 22: Kumulierter Energieaufwand zur Färsenaufzucht (0 bis 25 Monate) in MJ pro Färse	79
Abbildung 23: Energieintensität Nachzucht (Tabelle A8) [ $\Sigma 0,70 \text{ MJ kg}^{-1}$ Milch]	80
Abbildung 24: Kumulierter Energieaufwand Standardverfahren [ $28.315 \text{ MJ Kuh}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ] (Tabelle A12)	81
Abbildung 25: Energieintensität für die Futterbereitstellung in Abhängigkeit der Milchleistung	82



	<u>Seite</u>
Abbildung 26: Energieintensität des Verfahrens Milchproduktion unter Einfluss verschiedener Milchleistungen und Reproduktionsraten	84
Abbildung 27: Energieaufwand für die Herstellung von Stickstoffdünger	90
Abbildung 28: Kumulierter Energieaufwand der einzelnen Verfahrensabschnitte bezogen auf die erzeugte Milch im Standardverfahren [ $\Sigma$ 28.315 MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ]	96
Abbildung 29: Energieintensität Standardverfahren, Variante 1 und Variante 2 [MJ kg <sup>-1</sup> Milch]	115
Abbildung 30: Darstellung des Grenzwertbereichs des Indikators Energieintensität für den Verfahrensabschnitt Futtermittelbereitstellung im Milchproduktionsverfahren	116
Abbildung 31: Darstellung des Grenzwertbereichs des Indikators Energieintensität für den Verfahrensabschnitt Nachzucht im Milchproduktionsverfahren	117
Abbildung 32: Darstellung des Grenzwertbereichs des Indikators Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens	118
Abbildung 33: Vergleich der Energieintensität [MJ kg <sup>-1</sup> Milch] im Standardverfahren und in den Untersuchungsbetrieben 1 und 2	136
Abbildung 34: Darstellung des Grenzwertbereichs des Indikators Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens für die Untersuchungsbetriebe 1 und 2	137

## **Tabellenverzeichnis**

	<u>Seite</u>
Tabelle 1: Der OECD-Indikatorenkatalog, Auswahl nach OECD (1997)	8
Tabelle 2: Kumulierter Energieaufwand der Milchproduktion	24
Tabelle 3: Charakterisierung der Standortbedingungen in Nordost-Deutschland	41
Tabelle 4: Berechnete Aufzuchtmonate pro Kuh und Jahr in Abhängigkeit von der Reproduktionsrate	44
Tabelle 5: Varianten der Methode 3	50
Tabelle 6: Energieintensität für unterschiedliche Futtermittel für verschiedene Ertragsklassen	58
Tabelle 7: Trockenmasse, Energie- und Nährstoffgehalte der Futtermittel (SPIEKERS & POTTHAST, 2004)	59
Tabelle 8: Schnittertragsverteilung (LVLF, 2005)	62
Tabelle 9: Indirekter Energieaufwand von drei verschiedenen Fischgräten-melkständen ( $2 \times 8$ Melkplätze)	64
Tabelle 10: Indirekter Energieaufwand für Melkzeuge	64
Tabelle 11: Elektroenergieaufwand von verschiedenen Melkausrüstungen (in Anlehnung an JÄKEL, 2003)	65
Tabelle 12: Elektroenergieaufwand für die Verbraucher AMS, Kompressor und Milchkühlung (KTBL, 2005)	66
Tabelle 13: Elektroenergieaufwand für die Milchkühlung (Tierbestand: 600 Kühe) (nach JÄKEL, 2003)	67
Tabelle 14: Elektroenergieaufwand verschiedener Milchkühlungssysteme für automatische Melksysteme (DE KONING ET AL., 2002)	68
Tabelle 15: Elektroenergieaufwand für Reinigung und Desinfektion (nach JÄKEL, 2003)	68
Tabelle 16: Energieintensität für bauliche Anlagen	74
Tabelle 17: Kumulierter Energieaufwand einer Futterration für Jungvieh in der Altersklasse 2 für ganzjährige Stallfütterung	77
Tabelle 18: Energieintensität für die Futterbereitstellung [ $\text{MJ kg}^{-1}$ Milch] in Abhängigkeit von der Milchleistung und der Reproduktionsrate	82
Tabelle 19: Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens in Abhängigkeit spezieller Änderungen in den einzelnen Verfahrensabschnitten	92
Tabelle 20: Energieintensität für das Milchproduktionsverfahren in Abhängigkeit verschiedener Futterrationen und Haltungsbedingungen	93
Tabelle 21: Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens in Abhängigkeit von Verfahrensänderungen am Beispiel der Variante 1 (maximierte Energieintensität) und Variante 2 (reduzierte Energieintensität)	94
Tabelle 22: Energiegehalt der Futtermittel	97
Tabelle 23: Futterenergienutzung	97
Tabelle 24: Kumulierter Energieaufwand der Futterbereitstellung	98
Tabelle 25: Kumulierter Energieaufwand für Ziel- und Kuppelprodukte, die Fortwärme und das Methan aus der Verdauung [ $\text{MJ Kuh}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ]	98
Tabelle 26: Allokation des Energieaufwandes im Bereich Leistung	99
Tabelle 27: Ermittlung des kumulierten Energieaufwands für die Exkremente	100
Tabelle 28: Energieintensität zur Bereitstellung der jeweiligen Inhaltsstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) aus Wirtschaftsdünger	100

	<u>Seite</u>
Tabelle 29: Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung der im Wirtschaftsdünger enthaltenen Nährstoffe	101
Tabelle 30: Kumulierter Energieaufwand für Mineraldünger	101
Tabelle 31: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Rindergüllen mit extremen Nährstoffgehalten berechnet mit Energieäquivalent für Mineraldünger	102
Tabelle 32: Kumulierter Energieaufwand Standardverfahren	102
Tabelle 33: Variante 1 - Allokation des kumulierten Energieaufwandes auf die drei Produkte Milch, Schlachtkuh und Kalb	103
Tabelle 34: Variante 2.1 - Allokation des kumulierten Energieaufwands auf die Produkte Milch, Schlachtvieh, Kalb und Exkreme	104
Tabelle 35: Variante 2.2 - Allokation des kumulierten Energieaufwands der Verfahrensabschnitte auf das Zielprodukt Milch, ausgenommen kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung der Kuppelprodukte	105
Tabelle 36: Variante 2.3 - Allokation des kumulierten Energieaufwands der Futterbereitstellung des Produkts Schlachtkuh auf alle Produkte	106
Tabelle 37: Variante 2.4 - Allokation des kumulierten Energieaufwands auf die Produkte unter Berücksichtigung des Mineraldüngeräquivalents für die Exkreme (Tabelle 30)	107
Tabelle 38: Variante 2.5 - "Quartil" - Allokation des kumulierten Energieaufwands entsprechend einer bestimmten Rangliste der Anteile der Produkte am Energieaufwand der jeweiligen Verfahrensabschnitte	108
Tabelle 39: Variante 3.1 - Allokation des kumulierten Energieaufwands gleichberechtigt auf alle Produkte sowie Fortwärme und Methan aus der Verdauung	109
Tabelle 40: Variante 3.2 - Allokation des kumulierten Energieaufwands gemäß der Allokation im Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung	110
Tabelle 41: Nährwert der Produkte	111
Tabelle 42: Einkommen (€ pro Kuh und Jahr)	111
Tabelle 43: Energieintensität für die Erzeugung der Produkte im Milchproduktionsverfahren in Abhängigkeit der Allokationsvarianten	113
Tabelle 44: Energiebilanz Pflanzenbau des Untersuchungsbetriebes 1	121
Tabelle 45: Anbaustruktur Untersuchungsbetrieb 1	121
Tabelle 46: Entwicklung der Erträge des Untersuchungsbetriebes 1	121
Tabelle 47: Entwicklung des Düngemitelesatzes im Untersuchungsbetrieb 1	122
Tabelle 48: Energieintensität [ $\text{MJ kg}^{-1} \text{ TM}$ ] der Herstellung wirtschaftseigener Futtermittel des Untersuchungsbetriebes 1	123
Tabelle 49: Energieintensität im Untersuchungsbetrieb 1 ohne Berücksichtigung des Energieaufwands für die Exkreme auf der Weide	124
Tabelle 50: Energiebilanz Pflanzenbau Untersuchungsbetrieb 2	125
Tabelle 51: Anbaustruktur Untersuchungsbetrieb 2	126
Tabelle 52: Entwicklung der Erträge des Untersuchungsbetriebes 2	126
Tabelle 53: Entwicklung des Düngemitelesatzes im Untersuchungsbetrieb 2	127
Tabelle 54: Energieintensität für die Herstellung der Futtermittel im Untersuchungsbetrieb 2	127
Tabelle 55: Energieintensität im Untersuchungsbetrieb 2 [ $\text{MJ kg}^{-1} \text{ Milch}$ ]	128
Tabelle 56: Durchschnittlicher Düngemitelesatz in den Untersuchungsbetrieben 1 und 2	130

	<u>Seite</u>
Tabelle 57: Allokation des kumulierten Energieaufwands der Untersuchungsbetriebe 1 und 2 entsprechend der Allokationsmethode 2.5 - "Quartil" -	131
Tabelle A1: Energieaufwand für die Herstellung von Futtermitteln (kalkuliert mit REPRO) [GJ ha <sup>-1</sup> ]	168
Tabelle A2: Energieaufwand für Ackergrasanbau (kalkuliert mit REPRO) [GJ ha <sup>-1</sup> ]	169
Tabelle A3: Berechnung des kumulierten Energieaufwands für Standardration	170
Tabelle A4: Trockenmasse, Energie- und Nährstoffgehalte sowie kumulierter Energieaufwand der Futtermittel für die Standardration	174
Tabelle A5: Flächenbedarf für die Futterbereitstellung des Standardverfahrens der Milchviehhaltung	175
Tabelle A6: Technische Ausstattung Milchviehstall Standardausrüstung am Beispiel des Standardverfahrens (Stalltyp: KTBL MV 17003, 180 Tierplätze)	176
Tabelle A7: Kumulierter Energieaufwand für Maschinen in der Tierhaltung in Abhängigkeit unterschiedlicher Haltungssysteme am Beispiel des Milchviehs	183
Tabelle A8: Kumulierter Energieaufwand Nachzucht mit Ganztagsweide im Sommer	185
Tabelle A9: Kumulierter Energieaufwand Nachzucht ohne Weidehaltung	185
Tabelle A10: Flächenbedarf für die Bereitstellung des Grundfutters für das Standardverfahren Jungvieh	186
Tabelle A11: Kumulierter Energieaufwand für Maschinen in der Tierhaltung in Abhängigkeit unterschiedlicher Haltungssysteme am Beispiel des Jungviehs	187
Tabelle A12: Kumulierter Energieaufwand Standardverfahren	188
Tabelle A13: Überblick zur Verfahrensoptimierung des kumulierten Energieaufwands für den Verfahrensabschnitt Nachzucht in Abhängigkeit der Reproduktionsrate und des Haltungssystems	189
Tabelle A14: Energiebilanz Pflanzenbau - Untersuchungsbetrieb 1 -	190
Tabelle A15: Energiebilanz Grünland - Untersuchungsbetrieb 1 -	191
Tabelle A16: Energiebilanz Mais - Untersuchungsbetrieb 1 -	191
Tabelle A17: Energiebilanz Triticale - Untersuchungsbetrieb 1 -	192
Tabelle A18: Energiebilanz Pflanzenbau - Untersuchungsbetrieb 2 -	193
Tabelle A19: Energiebilanz Grünland - Untersuchungsbetrieb 2 -	194
Tabelle A20: Energiebilanz Mais - Untersuchungsbetrieb 2 -	194
Tabelle A21: Energiebilanz Ackerland - Untersuchungsbetrieb 2 -	195

**Übersichtsverzeichnis**

	<u>Seite</u>
Übersicht 1: Einteilung des Internationalen Agrarumwelt-Indikatorensystems der OECD (2001) (gekürzt)	9
Übersicht 2: Agrarumwelt-Indikatorensystem der EU (KOMM, 2001 - gekürzt)	10
Übersicht 3: Defizite von Umweltindikatorsystemen (WETTERICH, 2004)	11
Übersicht 4: Überblick der Grundstruktur der einzelnen Umweltindikatorenansätze (Walz, 1997)	16
Übersicht 5: Betriebliches Agrarumwelt-Indikatorensystem "Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung - KUL" (ECKERT ET AL., 1999 - gekürzt)	19
Übersicht 6: Definition des Produktsystems Tierhaltung	34
Übersicht 7: Definition des Produktsystems Milchviehhaltung	35
Übersicht 8: Methodik der Allokation des kumulierten Energieaufwands	49



## **1 Einleitung mit Problemstellung und Zielstellung**

Als Resultat der Konferenz für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro im Juni 1992 hat sich ein neues Leitbild etabliert, das inzwischen zu einem neuen Denken in der Umwelt- und Entwicklungspolitik geführt hat: die nachhaltige Entwicklung (UBA, 1997). Die weltweite Verständigung auf dieses Leitbild findet bereits statt, jedoch besteht eine Schwierigkeit darin, die speziellen Ansprüche zu konkretisieren und ihnen gerecht zu werden. Der Gedanke der nachhaltigen Entwicklung fordert, künftig alles Wirtschaften an den Grenzen der Tragfähigkeit des Naturhaushaltes zu orientieren und dabei zugleich die ökonomische und soziale Dimension zu berücksichtigen. Ökologie, Ökonomie und Soziales sollen zukünftig nicht mehr voneinander getrennt oder gar gegenübergestellt betrachtet werden, sondern vielmehr in einer Einheit.

Mit dem Aktionsprogramm "Agenda 21", welches auf der Rio-Konferenz von mehr als 170 Staaten unterzeichnet wurde, wird die Entwicklung und Anwendung von Indikatoren gefordert, mit deren Hilfe national und international Entwicklungsprozesse daraufhin überprüft werden können, ob sie dem Ziel der Nachhaltigkeit gerecht werden.

Der Verbrauch an Rohstoffen und fossiler Energie ist im Zuge der Intensivierung und Mechanisierung der Produktion im landwirtschaftlichen Bereich stetig angestiegen. Damit verbunden sind ein steigender Ressourcenverbrauch, Gefährdung der Nachhaltigkeit der Landbewirtschaftung und zunehmende Belastungen der Umwelt (KALISKI, 2003).

Im Bereich der Tierproduktion liegen gegenüber der Pflanzenproduktion vergleichsweise wenige Untersuchungen zum Energieaufwand vor (WECHSELBERGER, 2000).

Ziel des Forschungsvorhabens ist es einen Beitrag zur Entwicklung eines einheitlichen Lösungsweges zur Ermittlung des Energieaufwands in der Tierhaltung zu leisten. Am Beispiel der Milchproduktion erfolgt die Methodenentwicklung zur Energiebilanzierung. Dieses Produktionsverfahren wurde ausgewählt, weil es wirtschaftlich ein sehr bedeutender Zweig ist und die höchsten Ansprüche an die Bewertung von Verfahren der Tierhaltung stellt. Im Kontext dazu wird das Verfahren der Kälberproduktion betrachtet.

Seit der Rio-Konferenz wird weltweit intensiv an der Ableitung aussagefähiger, verfügbarer und abgestimmter Nachhaltigkeitsindikatoren sowie ihrer Einbindung in Bewertungsansätze gearbeitet (OECD, 1997; KOMM, 2000; LENZ ET AL., 2000).

Dabei entstanden zahlreiche Modelle, die sich in ihrer Komplexität, in der Indikatorenauswahl, den Analysemethoden, der Grenzwertsetzung und Aggregation der Indikatoren unterscheiden. So wurden z. B. in Deutschland das KUL-Verfahren (ECKERT ET AL.,

1999) und das Modell REPRO (HÜLSBERGEN, 2003), in Großbritannien das System EMA (Environmental Management for Agriculture, LEWIS & BARDON, 1998) und in den USA das ESI-Verfahren (Environmental Sustainability Index; SANDS & PODMORE, 2000) entwickelt.

Bei der Weiterentwicklung dieser Modelle sind noch eine Reihe methodischer Fragen bei der Analyse und Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme zu klären, u. a.:

- Welche räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen sind wann relevant (COSTANZA & PATTEN, 1995)?
- Wie lässt sich die bisher verbreitete isolierte Betrachtung von Indikatoren überwinden und ein Systemansatz verwirklichen (WALZ, 1998; HÜLSBERGEN, 2003)?
- Mit welchen Methoden sind Einzelkriterien in eine Gesamtaussage zu integrieren (ANDREOLI & TELLARINI, 2000; SANDS & PODMORE, 2000)?

Für die Nutztierhaltung wurde die Komplexität der Thematik, die von biologischen Grundlagen über Fragen der stofflichen und energetischen Effizienz bis hin zu sozio-ökonomischen Aspekten reicht, in Deutschland erstmals 1998 im Rahmen eines Workshops diskutiert (BRUNSCH ET AL., 1999).

Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit im Agrarbereich kommt der Ebene des Landwirtschaftsbetriebes besondere Bedeutung zu. Auf Betriebsebene werden konkrete Entscheidungen über Produktionsprozesse getroffen, die sowohl umwelt- als auch qualitätsrelevant sind. Auf dieser Ebene erfolgen die konkreten Eingriffe in die Steuerung der Prozesse. Durch eine Verknüpfung der Betriebsebene mit vor- und nachgelagerten Bereichen kann die gesamte Wertschöpfungskette analysiert und bewertet werden.

Potenzielle Einsatzgebiete von Indikatorenmodellen sind die Nachweisführung der guten fachlichen Praxis bzw. darüber hinausgehender Umweltleistungen, die Einbindung in Betriebsaudits, die Betriebsberatung, der Aufbau integrierter Umwelt- und Qualitätsmanagementsysteme (BERG ET AL., 2002; CHRISTEN ET AL., 2002; NEHRING, 2002).

Weiteres Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein methodisch-wissenschaftliches Fundament der Entwicklung und Anwendung geeigneter Indikatoren zu schaffen, um die Energieeffizienz auch im Bereich der Tierhaltung ermitteln und bewerten zu können. Mit der zu entwickelnden Methode wird der Energieaufwand in der Tierhaltung so de-



tailliert ermittelt, dass sich einzelne Verfahrensabschnitte beurteilen und dementsprechend gestalten und verändern lassen.

Darüber hinaus sollen anhand der detailliert zu prüfenden Indikatoren (bspw. Energieaufwand je kg erzeugter Milch, Energieaufwand je kg erzeugten Fleisches, Energieaufwand je kg erzeugten Futtermittels) für den Energieeinsatz in der Tierhaltung Toleranzbereiche gefunden werden, innerhalb derer der Landwirt ein ökonomisches Optimum suchen kann. Dadurch wird es möglich, sowohl den ökologischen als auch den ökonomischen und sozialen Aspekten der Nachhaltigkeit Rechnung zu tragen. Für eine umfassende Bewertung der Verfahren ist es erforderlich, neben dem Energieaufwand auch die anderen Kriterien, wie Umweltauswirkungen (Emissionen), Tiergerechtigkeit und Wirtschaftlichkeit - die teilweise konträr sind, in vergleichbarer Weise einzubeziehen.

Es ist zu untersuchen, welche Kenngrößen (wie z. B. der flächenbezogene oder der produktbezogene Energieaufwand/die Energieintensität) in welchem Maß geeignet sind, die Nachhaltigkeit von Verfahren/Betrieben zu bewerten und in welchem Zusammenhang die energetischen Indikatoren (bspw. Anteil regenerativer Energieträger am Gesamtenergieaufwand) zu anderen Indikatoren (z. B. Intensität des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln, Stickstoffüberschuss) stehen. Darüber hinaus soll geprüft werden, inwiefern sich auch im Bereich der Tierhaltung energetische Richtwerte/Zielwerte ableiten lassen - vergleichbar bspw. mit den Zielwerten für die Energieintensität im Pflanzenbau.

Um diese Zielvorstellungen zu realisieren, sollen Indikatoren ermittelt werden, anhand derer der Energieaufwand in der Tierhaltung bewertet werden kann.

Es sind Berechnungs- und Bewertungsalgorithmen zu entwickeln, die die Energieflüsse im Bereich der Tierhaltung darstellen und eine Bewertung innerhalb differenzierter Systemgrenzen ermöglichen. Plausibilitätskontrollen und Sensitivitätsanalysen werden anhand von Modell- und Praxisbetrieben unterschiedlicher Agrarräume Deutschlands ausgeführt.

## **2 Stand von Wissenschaft und Technik**

### **2.1 Nachhaltigkeit der Landwirtschaft**

Die Diskussion um den Begriff "Nachhaltige Entwicklung" hat seit dem Brundtland-Report der UNO von 1987 (WCED, 1987) fast alle Wirtschaftsbereiche, Verbände und politischen Organisationen erfasst.

Für die Umsetzung und das richtige Verständnis nachhaltiger Entwicklung/Nachhaltigkeit sind zwei Schlüsselbegriffe von zentraler Bedeutung. Das Konzept der Grundbedürfnisse (aller Menschen) und die Idee der Grenzen, besonders die Tragfähigkeit des globalen Ökosystems. Die Brundtland-Definition ist mit diesen zwei Schlüsselbegriffen verbunden, die erst die verkürzte Definition verständlich und vollständig machen: "Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs. It contains within it two key concepts:

- The concept of "needs", in particular the essential needs of the world's poor, to which overriding priority should be given, and
- The idea of limitations imposed by the state of technology and social organization on the environment ability to meet present and future needs".

Der Bericht "Our Common Future" der World Commission of Environment and Development (WCED) von 1987, aus dem dieses Zitat stammt, erweckte weltweit die Aufmerksamkeit auf das Konzept der Nachhaltigkeit.

Die Entwicklung der Weltbevölkerung und des Verbrauchs vieler Ressourcen weist sehr deutlich darauf hin, dass die Tragfähigkeit des Planeten Erde immer mehr belastet wird und damit die Entwicklungsmöglichkeiten zukünftiger Generationen begrenzt werden. Vor diesem Hintergrund ist in Rio de Janeiro 1992 als gemeinsamer Handlungsrahmen von der "United Nations Conference on Environment and Development" (UNCED) die "Nachhaltige Entwicklung" als zentrales Leitbild definiert worden. Während dieser Konferenz wurde die AGENDA 21, das Aktionsprogramm für den Übergang in das 21. Jahrhundert von 178 Staaten verabschiedet. Dieses fordert alle Staaten durch detaillierte Handlungsaufträge dazu auf, die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen sicherzustellen. Deutschland hat das Prinzip der Nachhaltigkeit 1994 als Staatsziel im Grundgesetz verankert (LÜTKE ENTRUP, 1999). Im landwirtschaftlichen Teil kann die Agenda 21 auch als Ablösung des alten Paradigmas der so genannten "Grünen Revolu-

tion" betrachtet werden. Die Konferenz in Rio hat eine intensive Nachhaltigkeitsdiskussion ausgelöst (HÜLSBERGEN, 2003).

Zur Definition einer nachhaltigen Landwirtschaft gibt es eine Vielzahl verschiedener Ansätze, die in Umfang und Präzisierungsgrad unterschiedlich sind. Einen sehr umfassenden Ansatz gibt ALLEN ET. AL (1991): "Eine nachhaltige Landwirtschaft ist ökologisch tragfähig, ökonomisch existenzfähig, sozial verantwortlich, ressourcenschonend und dient als Basis für zukünftige Generationen. Kernpunkt ist ein interdisziplinärer Ansatz, der die verschiedenen in Wechselbeziehung stehenden Faktoren berücksichtigt. Dies gilt für die gesamte Landwirtschaft sowie die verarbeitende Industrie im lokalen, regionalen, nationalen und internationalen Maßstab."

Diese Definition der nachhaltigen Landwirtschaft beinhaltet folgende Aspekte:

- Sicherung der ökonomischen Existenzfähigkeit der landwirtschaftlichen Unternehmen,
- Erhalt der Produktionsgrundlagen Boden, Wasser, Luft und die Schonung dieser Ressourcen,
- Sicherung der Lebensgrundlagen für nachfolgende Generationen (intergenerationelle Gerechtigkeit),
- Erhalt der biologischen Vielfalt, Schutz der natürlichen Ökosysteme, Erhalt der Agrarökosysteme,
- Verantwortung für die Nahrungsmittelversorgung einer wachsenden Weltbevölkerung,
- gesamtgesellschaftliche Verantwortung im nationalen und globalen Kontext.

Damit ist das Leitbild der nachhaltigen Landwirtschaft charakterisiert. Jedoch ist die inhaltliche Ausgestaltung der Zielgrößen nur schwer zu fixieren und mit allgemein gültigen Wertvorstellungen auszufüllen. Die Gesellschaft hat insgesamt keine einheitlichen Wertvorstellungen von landwirtschaftlichen Produktionsverfahren hinsichtlich der Bewertung der Nachhaltigkeit. Daher erscheint es sinnvoll und nötig, landwirtschaftliche Produktionssysteme durch geeignete - wissenschaftlich abgesicherte - Indikatoren zu messen und darzustellen, die das Prinzip der Nachhaltigkeit charakterisieren (LÜTKE ENTRUP, 1999).

## 2.2 Nachhaltigkeitsindikatoren

Als Indikatoren werden Parameter (Messgrößen) oder von Parametern abgeleitete Werte verstanden, die Informationen über einen bestimmten Sachverhalt liefern. Die Bedeutung eines Indikators geht in der Regel über den unmittelbar mit dem Parameter verbundenen Sachverhalt hinaus (OECD, 1997).

Um zu überprüfen, ob die tatsächliche Entwicklung mit dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung vereinbar ist, werden Nachhaltigkeitsindikatoren genutzt. Die Prüfung anhand umfassender, zeit- und kostenaufwändiger Analysen über Ressourcenverbrauch, Umweltsituation und die Auswirkungen aller individuellen Aktivitäten und politischen Entwicklungen ist nicht praktikabel. Einerseits würde auf diese Weise lediglich ein punktueller, auf den Untersuchungszeitpunkt bezogener Zustand bewertet. Andererseits wären die Analysen dann sehr umfangreich und komplex, so dass sie als Informationsgrundlage für gesellschaftliche Änderungen und politische Richtungskorrekturen kaum geeignet wären. "Das Problem bei der Beurteilung der Nachhaltigkeit ist nicht ein genereller Mangel an Daten, Materialien und Erkenntnissen, sondern die Schwierigkeit, die relevanten Informationen auszuwählen und in aussagefähigen Größen zusammenzufassen" (UBA, 1997).

Es ist also zweckmäßig, neben umfangreichen Daten und Analysen über den Zustand und die Entwicklung von Umwelt und Gesellschaft die Entwicklung von aggregierten Größen zu verfolgen. Diese sollen in einem engen Zusammenhang zur ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Situation stehen und diese mindestens grob abbilden können (UBA, 1997).

Die Entwicklung von Indikatoren für eine nachhaltige Entwicklung ist bereits in Kapitel 40 der AGENDA 21 (1992) gefordert: "40.4 Allgemein gebräuchliche Indikatoren wie etwa das Bruttonationalprodukt (BSP) und das Ausmaß einzelner Ressourcen- oder Schadstoffströme geben nicht genügend Aufschluss über die Frage der Nachhaltigkeit. Methoden zur Bewertung von Interaktionen zwischen verschiedenen sektoralen Umwelt-, Bevölkerungs-, Sozial- und Entwicklungsparametern sind nicht genügend weit entwickelt oder werden nicht in ausreichendem Maße genutzt. Es müssen Indikatoren für eine nachhaltige Entwicklung entwickelt werden, um eine solide Grundlage für Entscheidungen auf allen Ebenen zu schaffen und zu einer selbstregulierenden Nachhaltigkeit integrierter Umwelt- und Entwicklungssysteme beizutragen." Diese Nachhaltigkeitsindikatoren dienen der Selektion und Aggregation umfangreicher und komplexer

Informationen und sollen in wenigen, aber dafür aussagekräftigen Daten, die für eine nachhaltige Entwicklung relevanten wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bedingungen zentralisieren. "Ähnlich wie Körpertemperatur, Puls, Blutdruck oder Funktionsfähigkeit von Reflexen Rückschlüsse auf den Gesundheitszustand eines Menschen zulassen (ohne jedoch eine genaue Diagnose zu ersetzen), können Nachhaltigkeitsindikatoren Rückschlüsse auf den "Gesundheitszustand einer Gesellschaft" ergeben. Sie ersetzen keine umfassende Untersuchung, können jedoch früh Fehlentwicklungen anzeigen und Korrekturbedarf signalisieren. Außerdem ermöglichen sie Vergleiche der Entwicklung in verschiedenen Ländern" (UBA, 1997).

Neben allgemeinen Nachhaltigkeitsindikatoren (BMU, 2000) werden für die politische Arbeit differenzierte, problem- und sektorspezifische Indikatoren(-systeme) benötigt (WETTERICH, 2004). Die Diskussion der Nachhaltigkeitsindikatoren ist daher eng mit den Konzepten der Entwicklung von Umweltindikatoren verknüpft. Es geht dabei um die Festlegung eines aussagefähigen Satzes von Indikatoren, anhand derer eine Beurteilung der Umweltstrategie und -situation eines Landes (oder Region) möglich ist. Umweltindikatoren lassen sich demnach als Parameter verstehen, die auf der Basis statistischer Daten den Zustand der Umwelt und über menschliche Produktions- sowie Konsumaktivitäten entwickelt werden. Mit Bezug auf die Agrarlandschaft gibt PIORR (1998) folgende Definition für Agrarumweltindikatoren: "Indikatoren sind Parameter, die quantitative und qualitative Informationen über den Zustand und die Entwicklung komplexer Systeme geben. Umweltindikatoren der Agrarlandschaften geben Auskunft über die Nachhaltigkeit der Landnutzungssysteme, deren Einfluss auf benachbarte Ökosysteme sowie deren Veränderungen in ihrer zeitlichen und räumlichen Dimension." Mithilfe der Indikatoren werden die Daten in politikrelevante Informationen transformiert. Ziel ist es eine Bündelung von vielschichtigen, umfangreichen und kaum fassbaren Informationen zu erreichen. Schon die Auswahl der Indikatoren, die in einen solchen Indikatorensatz aufgenommen werden, erweist sich als problematisch (UBA, 1997).

Umweltindikatoren werden nach *Soll- und Ist-Indikatoren* unterteilt. Ist-Indikatoren sollen über den Zustand der Umwelt Auskunft geben. Soll-Indikatoren versuchen das angestrebte politische Ziel zu konkretisieren (RENNINGS, 1994). Bestandteil dieses Forschungsvorhabens ist die Ermittlung von Ist-Indikatoren, die wertende Aussagen zur Energieeffizienz in der Tierhaltung zulassen.

Die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) forderte ab Mitte der 90er Jahre die spezielle Entwicklung aussagekräftiger Umweltindikatoren für den Agrarbereich.

Praktische Bedeutung erlangten international abgestimmte Indikatoren bereits bei der Evaluierung von Agrarumweltprogrammen. So wird zur Begleitung und Bewertung der Programme ein Rahmen von Indikatoren für die Bereiche Sozioökonomie, Landwirtschaft und Umwelt vorgegeben. Die Kommission der Europäischen Gemeinschaften setzt sich dafür ein Umweltbelange stärker in die Agrarpolitik zu integrieren. Sie orientiert dabei auf den Indikatorenkatalog der OECD (Tabelle 1), so dass dieser eine zunehmende Verbindlichkeit erhält.

Tabelle 1: Der OECD-Indikatorenkatalog, Auswahl nach OECD (1997)

<b>Bereich</b>	<b>Indikator</b>
Düngung	Mineraldünger- und Wirtschaftsdüngeraufwand
Pflanzenschutzmittel	Applikation von Pflanzenschutzmitteln
klimarelevante Gase	Quellen, Menge und Anreicherung klimarelevanter Gase
Wasserqualität	Risiko der Wasserbelastung durch N- und PSM-Einträge
Wasserverbrauch	Beregnungs- und Bewässerungsintensität, Wasserverknappung
Bodenqualität	Risiko der Wasser- und Winderosion, Bodenproduktivität
Bodenschutz	Wasserhaltekapazität, Off-farm Bodenabfluss
Biodiversität	Diversität der natürlichen Fauna und Flora in Agrarlandschaften
Habitate	Größe der Habitate, Variabilität der Habitate (Habitattypen/Flächeneinheiten)
Landschaft	Kulturmerkmale und Management von Agrarlandschaften
betriebliche Potenziale	Standards für umweltverträgliche Produktionsverfahren
Betriebsmanagement	Index der Implementierung umweltverträglicher Produktionsverfahren
betriebliche Finanzen	Ausgaben für Agrarumweltbelange, betrieblicher Finanzausgleich
soziokulturelle Aspekte	landwirtschaftliche Einkommen

Die Umweltrelevanz der Landbewirtschaftung zeichnet sich im Vergleich zu beispielsweise industriellen Prozessen durch Charakteristika aus, die eine besondere methodische Herausforderung für die Entwicklung geeigneter Indikatoren darstellen (OECD, 1997 aus WETTERICH, 2004):

- Die Landwirtschaft stellt keine grundsätzlich umweltbelastende Wirtschaftstätigkeit dar. Vielmehr können durch entsprechende Formen der Landbewirtschaftung zahlreiche positive Umwelteffekte resultieren. Acker- und Grünlandflächen können beispielsweise einen wertvollen Lebensraum für viele wildlebende Tier- und Pflanzen-

arten darstellen, zeichnen sich durch vergleichsweise hohe Grundwasser-Neubildungsraten aus und können als Senke für Treibhausgase fungieren.

- Die Übergänge zwischen positiven und negativen Umweltwirkungen sind häufig fließend, beispielsweise im Bereich der Düngung oder Tierhaltung.
- Der Zusammenhang zwischen landwirtschaftlichen Tätigkeiten und den resultierenden Umwelteffekten ist in der Regel komplex, standortspezifisch und nichtlinear. Einzelne Faktoren, beispielsweise Düngung, wirken sich auf eine Vielzahl von ökologischen Funktionen sowohl im Agrarökosystem selbst, als auch in anderen Ökosystemen aus.
- Die Landwirtschaft unterliegt in den meisten Industriestaaten, vor allem auch innerhalb der Europäischen Union, einem hohen Maß an Subventionierung und Reglementierung. Die landwirtschaftlichen Aktivitäten werden wesentlich von politisch-rechtlichen Vorgaben und finanziellen Anreizen beeinflusst. Entsprechend hoch ist auch das Informationsbedürfnis für die Politik, wie sich agrarpolitische Maßnahmen auf die Umweltrelevanz der Landwirtschaft auswirken.

Im Auftrag der Agrar- und Umweltministerien der Mitgliedstaaten erarbeitete die OECD Umweltindikatoren für den landwirtschaftlichen Sektor. Als ein Zwischenergebnis wurde 2001 ein Katalog mit international abgestimmten Indikatoren veröffentlicht (Übersicht 1: OECD, 2001):

---

Übersicht 1: Einteilung des Internationalen Agrarumwelt-Indikatorensystems der OECD (2001) (gekürzt)

- I. Landwirtschaft im wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Kontext
  - II. Betriebsführung und Umwelt
  - III. Betriebsmittel und natürliche Ressourcen
  - IV. Umweltwirkungen der Landwirtschaft
- 

Die EU-Kommission zeigt auf europäischer Ebene ebenfalls starkes Interesse an Agrarumweltindikatoren (KOMM, 2000): "Die Ausarbeitung geeigneter Agrarumweltindikatoren ist im Hinblick auf eine erhöhte Transparenz und Rechenschaftspflicht sowie ein erfolgreiches Monitoring, Kontrolle und Evaluierung besonders wichtig. Sie wird einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Umsetzung der politischen Konzepte und zum Gesamtevaluierungsprozess leisten". Im Rahmen der WTO-Verhandlungen könnte den

Agrarumweltindikatoren zukünftig die Funktion zukommen, die Agrarförderung in der Europäischen Union durch nachweislich positive Umwelteffekte rechtfertigen zu können (MÜNCHHAUSEN & NIEBERG, 1997)

Dazu wurde ein erster grob ausgearbeiteter Vorschlag erstellt (Übersicht 2).

---

Übersicht 2: Agrarumwelt-Indikatorensystem der EU (KOMM, 2001 - gekürzt)

- Vorhandensein regionaler Umweltziele
  - Anteil der Landwirtschaft an Emissionen, Nitratverunreinigungen und Wasserverbrauch
  - Energieverbrauch
  - Einhaltung der guten fachlichen Praxis
  - Anbau und Tierhaltungsformen
  - Intensivierungs-/Extensivierungstendenzen
  - Wasserverbrauch
  - Bodenerosion
  - genetische Vielfalt der Nutzpflanzen/-tiere
  - Auswirkungen auf Lebensräume und Biodiversität
  - Produktion erneuerbarer Energieträger
- 

Auch auf Bundesebene und durch das Umweltbundesamt werden Agrarumweltindikatoren für die nationale Umweltberichterstattung und Politikberatung gefordert. Die speziellen landwirtschaftlichen Umweltwirkungen werden in der bisherigen Umweltberichterstattung nur unzureichend abgebildet (BFN, 1999; BFN, 2002; UBA, 2001). Im Auftrag des Umweltbundesamtes haben GEIER ET AL. (1999) einen Vorschlag für ein nationales Agrarumweltindikatorensystem erarbeitet.

Nationale Agrarumwelt- bzw. Agrarnachhaltigkeitsindikatorensysteme sind in verschiedenen Ländern vorgeschlagen und teilweise auch realisiert worden, beispielsweise in Finnland (YLI-VIIKARI, 1999), Großbritannien (MAFF, 2000) und Kanada (MCRAE ET AL., 2000).

Auch auf betrieblicher Ebene gewinnen Umweltindikatoren zunehmend an Bedeutung. So wurden in den letzten Jahren mehrere Verfahren zur Bewertung der Umweltwirkung von landwirtschaftlichen Betrieben entwickelt, wie beispielsweise die Bewertungsmodelle REPRO und KUL (siehe Gliederungspunkt 2.3).



Die Luxemburger Beschlüsse zur Reform der gemeinsamen EU-Agrarpolitik sehen unter anderem die Einführung betrieblicher Audits sowie von *cross compliance* zur Bindung von Direktzahlungen an die Einhaltung von Umwelt-, aber auch Tierschutz- und Lebensmittelsicherheitsstandards vor (WETTERICH, 2004). Agrarumweltindikatoren als Instrument zur Kontrolle landwirtschaftlicher Betriebe, beispielsweise bezüglich der Einhaltung der guten fachlichen Praxis, werden von BERG ET AL. (2002, 2003) gefordert.

Insgesamt werden Unterschiede in der inhaltlichen Schwerpunktsetzung der einzelnen Indikatorenvorschläge der verschiedenen Autoren deutlich. Unterschiede liegen in den methodischen Bereichen Umfang, Gliederung, der kausalen Ansatzstelle der Indikatoren sowie in ihrem Ausarbeitungs- und Konkretisierungsgrad.

Bei Umweltindikatorsystemen werden häufig Defizite angemerkt (Übersicht 3).

---

#### Übersicht 3: Defizite von Umweltindikatorsystemen (WETTERICH, 2004)

- "Mangelnde Transparenz und Nachvollziehbarkeit bei der Herleitung der berücksichtigten Umweltkategorien und der Auswahl der Indikatoren. Teilweise fehlende Berücksichtigung von Umweltwirkungen ohne Begründung.
  - Intransparente Vermischung ökonomischer und ökologischer Zielsetzungen.
  - Fehlende Angaben zur konkreten Umsetzung und Darstellung der Indikatoren.
  - Fehlende bzw. unzureichende Hilfestellungen bei der Interpretation vorgeschlagener Indikatoren."
- 

In einer ganzen Reihe von Ländern befasst man sich mit der Nutzung der Indikatoren Energieeinsatz und Energieeffizienz. Auf dem Gebiet der Landwirtschaft fanden diese Indikatoren bislang vor allem Eingang im Bereich der erneuerbaren Energien (SCHOLZ ET AL., 1998; OECD, 2001). Der Energieeinsatz ist aber generell für alle Produktionsverfahren ein Nachhaltigkeitsindikator. Er findet auch bei der Bewertung der Tierhaltungsverfahren Berücksichtigung (UBA, 2002). Die bisherigen Arbeiten zum Energieeinsatz in der Tierhaltung sind sektoral angelegt und vernachlässigen die Wechselwirkungen mit dem Pflanzenbau (CLAUSEN, 2000; SCHMIDT, 2001; JÄKEL, 2003). Die Verteilung des kumulierten Energieaufwands innerhalb der Tierhaltungsverfahren zeigt, wie wichtig es ist, den Pflanzenbau in die Betrachtungen einzubeziehen. Beispielsweise beansprucht die Futtererzeugung und -bereitstellung etwa drei Viertel des kumulierten Energieaufwands in der Milchviehhaltung (BERG & SCHOLZ, 2000). Auf diese Größe

kann Einfluss genommen werden durch die Gestaltung der pflanzenbaulichen Verfahren, insbesondere der Düngung, und der Rationen in der Rinderfütterung. Diese wirken sich wiederum auf die Stoffströme, das Emissionsgeschehen sowie die pflanzlichen und tierischen Erträge aus. Daran wird besonders deutlich, dass es darauf ankommt, die Stoff- und Energieströme für vollständige Produktionssysteme (Pflanzenbau und Tierhaltung) in einem gemeinsamen Modell darzustellen und zu bewerten.

Der Energieeinsatz insgesamt kann bereits ein Maß für die Eingriffe in die Agrarökosysteme und damit für potenzielle Umweltwirkungen sein (HÜLSBERGEN, 2003). Eine Unterscheidung von fossiler und erneuerbarer Energie verbessert seinen Aussagegehalt. Der Einsatz fossiler Energie kennzeichnet direkt die Nutzung/Ausbeutung nicht-erneuerbarer Ressourcen.

In Systemen wie dem Pflanzenbau, in denen der Boden den entscheidenden limitierenden Faktor darstellt, ist die Fläche die Bezugsgröße für den Energieeinsatz ( $\text{GJ ha}^{-1}$ ). Der Bezug auf die Produkteinheit bringt die Effizienz des Energieeinsatzes zum Ausdruck - Energieintensität ( $\text{MJ GE}^{-1}$  oder  $\text{MJ kg}^{-1}$  Produkt) (BERG & HELLEBRAND, 2000).

PIORR (1998) stellt eine Reihe von Problemen bei der Anwendung von Agrarumweltindikatoren fest. Diese Schwachstellen der diskutierten Indikatorensysteme machen deren Ansätze grundsätzlich angreifbar. Kritikern wird es daher leicht gemacht, mit dem Vorwurf, "die Auswahl und Formulierung der Indikatoren sei eine willkürliche Angelegenheit mit nur geringer theoretischer Untermauerung" (Zitat EU-Parlament, 2001), die bestehenden Systeme zu diskreditieren (ECKERT & GERNAND, 2000).

### **2.3 Modelle und Bewertungsansätze**

Eine Vielzahl von Indikatorenkonzepten wurden bereits auf nationaler und internationaler Ebene vorgeschlagen und diskutiert (WALZ, 1998). Im Folgenden werden allgemeine Angaben zu Indikatorenmodellen und deren Entwicklung gemacht sowie ausgewählte Indikatorenkonzepte, die sich mit dem Agrarsektor befassen, vorgestellt.

Die bisher verfügbaren Indikatorenmodelle unterscheiden sich im Hinblick auf:

- die gewählten Nachhaltigkeitsindikatoren: Welche Indikatoren werden verwendet und wie viele? Welche Komplexität wird erreicht? Werden alle relevanten Bereiche abgebildet?

- die zugrunde liegenden Analysemethoden und Modelle: Wie werden die Werte der Indikatoren ermittelt? Werden die Indikatoren isoliert betrachtet oder wird ein vernetzter, systemischer Ansatz verfolgt (WALZ, 1998; HANSEN & JONES, 1996)?
- die Datengrundlage: Wie detailliert und belastbar sind die Eingangsdaten? Handelt es sich um Messwerte (HÜLSBERGEN ET AL., 2000), Simulations- bzw. Modellwerte (VAN KEULEN, 1995) oder statistische Daten?
- die Systemebene: Auf welcher Skalenebene erfolgt die Bewertung: Parzelle, Schlag, Fruchtfolge (HEYLAND, 1998), Betrieb (EDWARDS ET AL., 1993), Wassereinzugsgebiet, Agrarlandschaft (FREYER ET AL., 2000)?
- die Zielwerte: Welche Ziel- oder Schwellenwerte werden verwendet? Sind sie regionsspezifisch? Wer war an ihrer Ableitung beteiligt?
- die Aggregation der Indikatoren zu einem Gesamtindex (ANDREOLI & TELLARINI, 2000): Welche Aggregationsregeln werden befolgt (FÜRST & KLEMMSTEDT, 1997)?

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen stellte fest, dass "in der Mehrzahl der Indikatorenprojekte (...) aus der Vielzahl der vorhandenen Daten und Indikatoren geeignete ausgewählt (bottom-up-Verfahren), ohne jedoch sicherstellen zu können, dass die Indikatoren später auch tatsächlich adäquate Auskunft über die Umwelt geben" werden (SRU, 1998).

In unterschiedlichen Projekten wurde eine Vielzahl von Indikatoren vorgeschlagen. Im nächsten Schritt soll daraus eine Auswahl vorgenommen werden, um zu einem überschaubaren Indikatorensatz zu gelangen. Zur methodischen Absicherung dieses Vorgangs wurden sowohl unter wissenschaftlichen als auch unter pragmatischen Gesichtspunkten Kriterien erstellt, anhand derer die Indikatorenauswahl vorzunehmen ist (SRU, 1998; PIORR, 1998). Die zentralen Anforderungskriterien sind (OECD, 1997):

- politische und gesellschaftliche Relevanz,
- enger Wirkungszusammenhang zwischen Umweltsituation und Indikator,
- Verständlichkeit und gute Kommunizierbarkeit,
- gute Datenverfügbarkeit.

Die Auswahl geeigneter Indikatoren wird dadurch erschwert, dass häufig Zielkonflikte zwischen den Anforderungen bestehen. Der Anspruch auf fachliche Validität steht oft im Widerspruch zu einer guten Kommunizierbarkeit und Datenverfügbarkeit. Gute Kommunizierbarkeit erfordert eine begrenzte Anzahl an vergleichsweise einfachen und

allgemeinverständlichen Indikatoren. Dies kann mit den wissenschaftlichen Ansprüchen der individuellen Fachdisziplinen und der tatsächlichen Komplexität der Agrarökosysteme schwer vereinbar sein. Weil im Normalfall kein Indikator allen Anforderungskriterien in vollem Umfang entspricht, sind Abwägungen und Kompromisse erforderlich (WETTERICH, 2004).

Als weiteres Hilfsmittel für die Zusammenstellung und Strukturierung von Indikatorensystemen ist die Klassifizierung von Indikatortypen zu nennen. Indikatoren können beispielsweise danach eingeteilt werden, an welcher kausalen Stelle eines Umweltproblems sie ansetzen. Aktivitäten der OECD führten zur Entwicklung eines Modellansatzes, auf dem auch viele andere Modelle aufbauen - des **Driving Force - State - Response - (DSR) Modells** (früher: PSR). Dieser Modellansatz unterscheidet die Indikatoren bezüglich der Antriebskräfte (*driving force*, früher *pressure*), des Umweltzustandes (*state*) und der Maßnahmen bzw. Reaktionen (*response*) (Abbildung 1).

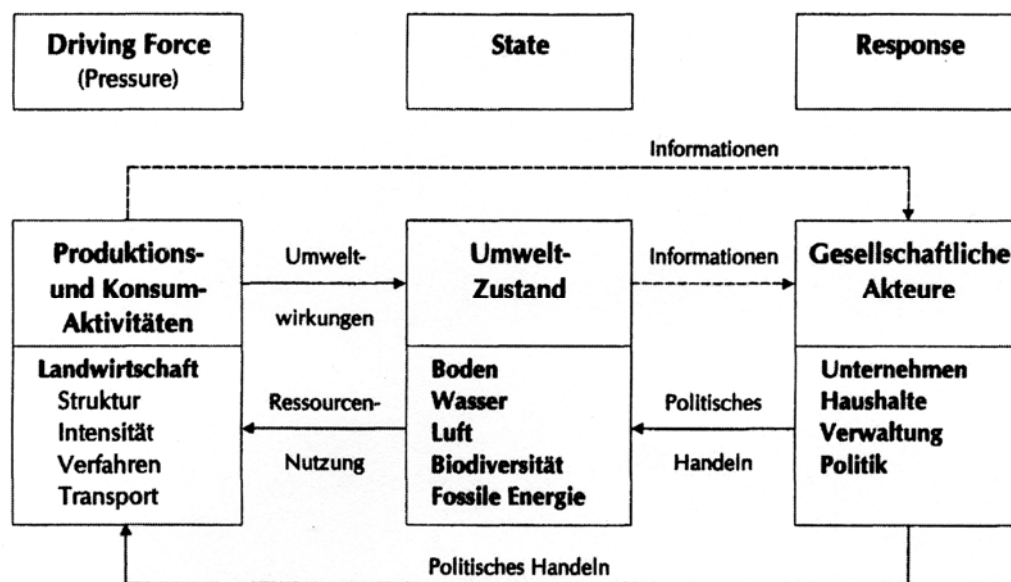


Abbildung 1: Driving-Force-State-Response-(DSR)-Modell  
(MÜNCHHAUSEN & NIEBERG, 1997)

Im Modell werden folgende drei Bereiche unterschieden:

- "*Driving-Force-Indicators*" (indirekte Indikatoren) erfassen umweltrelevante Aktivitäten, die potenziell Druck auf die Umwelt ausüben können (MÜNCHHAUSEN & NIEBERG, 1997). Indem sie die Intensität des menschlichen Einflusses auf ein Schutzgut verdeutlichen, setzen sie nur indirekt an den Umweltzustand an. Da sie einer tatsächlich feststellbaren Umweltveränderung zeitlich-kausal vorausgehen (Abbildung 1), kommt ihnen eine wichtige Funktion als Frühwarnsystem zu.

- "*State-Indicators*" (Zustandsindikatoren) beschreiben den Umweltzustand direkt und sind somit die eigentliche Zielgröße eines Monitorings bzw. aller Bemühungen um ein Schutzgut. Die Erfassung dieser Indikatoren ist im Allgemeinen mit recht hohen Kosten verbunden, aber aus fachlicher Sicht unverzichtbar, weil andernfalls bspw. keine Möglichkeiten der Wirkungs- und Effizienzkontrolle von Agrarumweltmaßnahmen gegeben sind. Besonders interessant sind *state*-Indikatoren im Gebiet Biodiversität, da Verluste biologischer Vielfalt oft irreversibel sind und ein möglichst frühzeitiges Gegensteuern erfordern (WBGU, 2000).
- Die mit Indikatoren gewonnenen Informationen können zu einer Reaktion ("*Response*") der Gesellschaft führen. Sie vervollständigen das Indikatorensystem, indem sie die Art und Weise der staatlichen und/oder gesellschaftlichen Reaktion auf ein Umweltproblem wiedergeben. Idealerweise lassen sie prognostizieren, in welche Richtung sich zukünftig eventuell mögliche *driving-forces* ändern werden.

Mit dem DSR-Modell sind drei Hauptfragen zu beantworten (GUTSCHE, 1997):

- Was verursacht die Veränderung der Umwelt?
- Welche Effekte haben die Faktoren auf den Zustand der Umwelt?
- Welche Maßnahmen werden ergriffen, um dieser Zustandsänderung zu begegnen?

Bei der Ableitung von Indikatoren in den drei genannten Bereichen sollen nach Möglichkeit kausale Zusammenhänge hergestellt werden (SRU, 1998).

HÜLSBERGEN (2003) gibt an, dass in neueren Publikationen darauf hingewiesen wird, dass die Beziehungen zwischen Landwirtschaft und Umwelt im Kontext der nachhaltigen Entwicklung zu betrachten sind, also sozioökonomische Kategorien eingeschlossen sein müssen.

Das DSR-Modell ist so allgemein gehalten, dass es den Rahmen für die Entwicklung spezifischer, regional angepasster Indikatorenmodelle bilden kann.

Bei der Analyse der in den einzelnen Ansätzen angewendeten Indikatortypen zeigt sich eine eindeutige Tendenz: Der von der OECD vorgeschlagene Pressure-State-Response-Ansatz bildet einen umfassenden Rahmen, der die in den untersuchten Ländern verwendeten Indikatorentypen integrieren kann (Übersicht 4).

Übersicht 4: Überblick der Grundstruktur der einzelnen Umweltindikatorenansätze  
(Walz, 1997)

Indikatortyp	OECD	Niederlande	Kanada	Schweden	Norwegen	Eurostat	CSD	Stat. Bundesamt
	pressure-state-response	pressure	pressure-state-response	state; Entwicklung von pressure and state angestrebt	bisher pressure-state; response angedacht	pressure-state-response	pressure-state-response	pressure-state-response; Akzeptoren
Klassifikation Umweltprobleme	Problembereiche	Problembereiche	Umweltmedien mit Problembereichen	Ökosysteme	Problembereiche	Problembereiche	Problembereiche	Problembereiche; Biotop- bzw. Ökosystemtypen
räumliche Disaggregation	nationale Ebene; regionale Umweltprobleme, wenn von nationaler Bedeutung	nationale Ebene; zusätzlich regionale Ebene geplant	nationale Ebene; regionale Ebene bei gravierenden regionalen Unterschieden	nationale Ebene; in Einzelfällen regionale Aufgliederung denkbar	nationale Ebene	nationale Ebene; regionale Ebene z. T. bei state-indicators notwendig	nationale Ebene	Meso-nationale Ebene; räumliche Untergliederung bei state
sektorale Disaggregation	sektorale Untergliederung geplant	sector indicators	z. T. einzelne Branchen betrachtet	bisher nicht (state indicators)			bisher nicht	Emittentenstruktur; Fachserie 19, Reihe 5
Aggregation Umweltindikatoren	Aggregation innerhalb der Umweltkategorien angestrebt	vollständige Aggregation zu einer Maßzahl	Aggregation zu einer Maßzahl abgelehnt	Aggregation angestrebt, aber keine näheren Angaben	Aggregation zu einer Maßzahl skeptisch beurteilt	Aggregation angestrebt	Aggregation langfristig angestrebt	Diskussion um Ökosozialprodukt und andere Aggregationsverfahren

Der Pressure-State-Response-Ansatz von Kanada, Eurostat und der CSD wird ausdrücklich unterstützt. Norwegen verwendet einen Pressure-State-Ansatz und die Niederlande nutzen lediglich Pressure-Indikatoren. Der schwedische Ansatz betrachtet zwar vordergründig State-Indikatoren, geplant ist aber eine Erweiterung entsprechend des OECD-Vorgehens. Zu beobachten ist, dass ein erheblicher Entwicklungsbedarf im Bereich der Response-Indikatoren besteht. Response-Indikatoren werden nur sehr vereinzelt in den nationalen Ansätzen angewandt (WALZ, 1997).

Auch in Finnland wurden erste Schritte hin zu einer systematisierten Entwicklung von Nachhaltigkeitsindikatoren unternommen. YLI-VIIKARI (1999) hat die gestellte Aufgabe als Prozess erkannt und unterscheidet folgende Schritte: Zieldefinition und Festlegung des methodischen Rahmens, Auswahl der Themenbereiche, Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Bewertung der gewählten Themenbereiche, Datensammlung und Interpretation der Ergebnisse. Die Autorin benennt die von ihr vorgeschlagenen Indikatoren nur "überschriftenartig", grob beispielsweise "pesticide use", "modelling of agricultural emissions and sinks" and "biodiversity indicators at species level". Dadurch stellen sich der Autorin viele zentrale methodische Fragen zur Ausgestaltung der Indikatoren nicht (WETTERICH, 2004).

MITCHELL ET AL. (1995) haben die Notwendigkeit einer tiefergehenden methodischen Betrachtung zur Indikatorenermittlung früh erkannt. In Großbritannien wurde 1995 die "PICABUE-Methode" zur Entwicklung von Indikatoren für eine nachhaltige Stadtentwicklung vorgestellt. Die PICABUE-Methode sieht sieben Verfahrensschritte vor.

MITCHELL ET AL. (1995) nennen folgende Gesichtspunkte als Kriterien: Relevanz und wissenschaftliche Validität; räumliche, zeitliche und soziale Sensitivität; Datenkonsistenz; Verständlichkeit; geeignete Datenaufbereitung; Messbarkeit; Ziel- oder Grenzwertfähigkeit. Nach WETTERICH (2004) ist die PICABUE-Methode der bisher einzige Ansatz einer systematischen Indikatorenentwicklung, obwohl sie bei den Detailfragen der Indikatorenbildung eher an der Oberfläche verbleibt. Dieses Verfahren bezieht sich konsequent auf die vielfältig vernetzten, besonderen Aspekte der nachhaltigen Stadtentwicklung. Es entspricht nur teilweise den davon abweichenden Zielsetzungen der Entwicklung sektoraler Umweltindikatoren. Bei der Bildung von Umweltindikatoren sollten funktionale und kausale Zusammenhänge tiefgehender berücksichtigt werden als

dies in der eher auf eine deskriptive Zustandsbeschreibung ausgerichteten PICABUE-Methode verankert ist.

MITCHELL ET AL. (1995) gaben eine Einschätzung der Situation der Entwicklung und Anwendung von Nachhaltigkeitsindikatoren, welche auch auf dem Gebiet der Agrarumweltindikatoren zutreffend ist: "However, many of the currently used sustainability indicators are simply social or economic performance indicators and indicators derived for state-of-the-environment reporting that have been selected from pre-existing lists, with little or no modification, and are presented as "sustainability indicators". Some of these indicators may well prove to be excellent indicators, but without a coherent methodology underlying their selection, their utility remains questionable. The methodology underlying an indicator is valuable because it gives greater credibility to indicator choices, allows for more effective participation in indicator development, simplifies identification of indicators appropriate to different geographical localities, and can produce indicators with long-term robustness"

Neben dem DSR-Modell der OECD existieren weitere, teilweise stärker differenzierte Ansätze für die Gliederung von Indikatoren, wie das "Stress-" oder das "Akteur-Akzeptor-Modell". Diese Ansätze bringen jedoch nur geringen substanziellen Fortschritt und konnten sich deshalb bisher kaum durchsetzen (SRU, 1998).

Das DSR-Modell wurde von der EU ausgehend zum DPSIR-Modell erweitert, welches detaillierter unterscheidet zwischen *driving force* und *pressure* sowie in *state* und *impact* (KOMM, 2000; KOMM & EUROSTAT, 2002). *Impact* drückt die Annahme aus, dass der Umweltzustand an den landwirtschaftlichen Standorten sich auch auf die übrige Umwelt positiv oder negativ auswirkt. Auch die Ausweitung der im Einzelfall schwer gegeneinander abgrenzbaren Kategorien bringt keine Verbesserung des resultierenden Indikatorensystems. Weiterführend wird das DSR-Modell der OECD als Richtlinie betrachtet, da es teilweise auch als PSR-Modell bekannt, national und international bislang das höchste Maß an Akzeptanz gefunden hat (MÜNCHHAUSEN & NIEBERG, 1997; YLI-VIIKARI, 1999; CHRISTEN ET AL., 2002).

Unterschiedliche Bewertungsverfahren haben bisher Eingang in die Praxis gefunden. In den einzelnen Modellen werden bestimmte Aspekte besonders stark gewichtet. Zu nennen sind hier beispielhaft das von GIRARDIN ET AL. (1996) entwickelte, durch BOCKSTALLER ET AL. (1997) weiterentwickelte Bewertungskonzept "Agro-Ecological-



Indicators" (AEI), in Großbritannien das computergestützte System "Environmental Management for Agriculture" (EMA) (LEWIS & BARDON, 1998), in den USA das Verfahren "Environmental Sustainability Index" (ESI) (SANDS & PODMORE, 2000) sowie in Deutschland das Verfahren "Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung" (KUL) (ECKERT ET AL., 1999) und das Modell "Reproduktion der organischen Substanz" (REPRO) (HÜLSBERGEN, 2003).

Da im KUL-Ansatz der Aspekt Stoff- und Energiehaushalt im Vordergrund steht, wird es im Folgenden näher betrachtet. Das Bewertungssystem "Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung" (KUL) wurde 1994 erstmals vorgestellt (ECKERT & BREITSCHUH, 1994). Im KUL-System werden in sieben Kategorien 30 quantifizierbare Kriterien erfasst und jeweils ökologische Optima oder kritische Belastungsgrenzen definiert. Die Bewertung jedes betrachteten Gefährdungspotenzials erfolgt durch eine Bewertungsnote, der eine Boniturskala zugrunde liegt. Die folgende Übersicht 5 enthält einen Ausschnitt der beobachteten Kriterien des Bewertungssystems KUL.

---

Übersicht 5: Betriebliches Agrarumwelt-Indikatorensystem "Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung - KUL" (ECKERT ET AL., 1999 - gekürzt)

- Nährstoffhaushalt
  - Bodenschutz
  - Pflanzenschutz
  - Landschafts- und Artenschutz
  - Energiebilanz
  - Energieinput Gesamtbetrieb
  - Energiesaldo Gesamtbetrieb
  - Energieinput Pflanzenbau
  - Energiesaldo Pflanzenbau
  - Energieinput Tierhaltung
  - Energiesaldo Tierhaltung
- 

Die Unterteilung des Kriteriums Energiebilanz befasst sich mit dem Gesamtbetrieb sowie mit den einzelnen Bereichen Pflanzenproduktion und Tierproduktion. Im Bereich Gesamtbetrieb sind sowohl ein zu hoher Energieinput als auch ein unnötig verminderter Energiesaldo ökologisch unerwünscht, da sie zum einen eine vermehrte CO<sub>2</sub>-Emission aus fossilen Energieträgern begünstigen und zum anderen eine ungenügende Faktoreffi-

zienz infolge energetisch ungünstiger Verfahrensabläufe signalisieren. "Der Energiesaldo ergibt sich als Differenz zwischen dem Eintrag an fossiler Energie in den Betrieb (Energieträger, Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel, Prozessenergie für zugekaufte Futtermittel und Saatgut etc.) und dem Energieinhalt aller den Betrieb verlassenden pflanzlichen und tierischen Marktprodukte, abzüglich des Energieinhaltes zugekaufter Vorleistungen (Saatgut, Futtermittel, Tiere)" (ECKERT ET AL., 1999). Der Bereich Pflanzenbau soll bei einer hohen Effizienz der Produktionsverfahren, d. h. bei möglichst niedriger Umweltbelastung zu einem hohen Zugewinn an phytosynthetisch gebildeter organischer Masse gelangen. Das ist die Grundlage für einen in den Toleranzbereichen befindlichen Energiesaldo sowohl für den Gesamtbetrieb als auch für die Tierhaltung. Im Betriebszweig Tierhaltung wird ebenfalls eine hohe Faktoreffizienz angestrebt, wenn auch der Energiesaldo der Tierhaltung meist negativ ist. Input und Saldo werden in der Tierproduktion nicht auf Hektar, sondern auf Großvieheinheit (GV) bezogen (ECKERT ET AL., 1999).

Der KUL-Ansatz ist als pragmatisch und anwenderorientiert einzustufen, da vorwiegend Indikatoren und Methoden aufgenommen wurden, die sich mit begrenztem Aufwand bearbeiten lassen (HÜLSBERGEN, 2003).

Die genannten Modelle unterscheiden sich in der Komplexität und in der Indikatorenauswahl, aber auch bezüglich der zugrunde liegenden Analysemethoden, der Grenzwertsetzung und der Aggregation der Indikatoren. Ein genereller Nachteil ist der fehlende Systemansatz der Modelle. Die Indikatoren werden isoliert betrachtet, dadurch treten Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten in den Hintergrund. Um zu einer Gesamtaussage zu kommen, werden in den meisten Modellen unterschiedliche Techniken kombiniert (Methodenmix). Es ist absehbar, dass eine vollständige Harmonisierung im Sinne eines allgemein anerkannten Bewertungsverfahrens, selbst für Teilbereiche, derzeit nicht zu realisieren ist (HÜLSBERGEN, 2003).

Die angesprochenen Nachteile der verschiedenen Modellansätze, insbesondere die fehlende Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten (bspw. Boden - Pflanze - Tier) und die isolierte Betrachtung von Einzelindikatoren sowie der zunehmende Bedarf an Indikatorenmodellen waren Anlass zur Entwicklung des Modells REPRO. Das Modell REPRO ist für wissenschaftliche und praktische Anwendungen konzipiert (HÜLSBERGEN, 2003). REPRO unterscheidet sich von den anderen

Modellen inhaltlich durch den Systemansatz und technisch durch die Umsetzung als praxisanwendbare Software. Es bildet den gesamten Landwirtschaftsbetrieb ab und beschreibt ihn als System vernetzter Stoff- und Energieflüsse. Als wesentliche Einflussfaktoren werden die Standortbedingungen, die Betriebsstruktur und die Verfahrensgestaltung erfasst. Dieser komplexe Ansatz erlaubt es, nicht nur Ist-Indikatoren zu analysieren, sondern auch Szenariorechnungen durchzuführen.

In REPRO werden neben den In- und Outputs über die Betriebsgrenze (Black-Box-Ansatz) auch die innerbetrieblichen Stoff- und Energieflüsse anhand von Nährstoff-, Humus-, Futter- und Energiebilanzen analysiert.

Die in REPRO eingebundene Normalisierungstechnik gestattet zur Gesamtbewertung von Betriebssystemen in Maßeinheiten angegebene Indikatorenwerte in dimensionslose Werte zu überführen. Dabei kennzeichnet der Wert 0 die ungünstigste (nicht nachhaltig) und 1 die günstigste Situation (nachhaltig) (HÜLSBERGEN, 2003).

#### **2.4 Ableitung von Zielwerten zur Einschätzung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme**

Die Ableitung von Zielwerten, also das Setzen von definierten Wertebereichen für einzelne Indikatoren, ist notwendig, um die Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme treffend einschätzen zu können. Die Verbindlichkeit der Zielwerte ist unterschiedlich. Gesetzliche Festlegungen (Grenzwerte) und fachliche Übereinkünfte (Richtwerte) lassen sich als Bewertungsmaßnahmen unterscheiden (siehe Abbildung 2).

Die Bestimmung der Werte muss nicht immer bis zur gesetzlichen Fixierung reichen, um Entscheidungen darauf abzustützen. Abhängig vom Grad der Umweltbelastung, an dem solche Werte ansetzen, kann zwischen Schutzstandards und Vorsorgestandards unterschieden werden. Mit steigender Anzahl gewählter Indikatoren und anspruchsvolleren Bewertungen erfolgt eine vermehrte Kostenübertragung der Umweltentwicklung auf die Verursacher. Die Ableitung von Zielwerten stellt eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Die Festlegung anzustrebender Wertebereiche kann nicht von einzelnen Wissenschaftlern oder Arbeitsgruppen allein getroffen werden. Zur Umsetzung der Zielvorstellungen bedarf es öffentlicher Diskussionen und einer breiten Übereinstimmung.

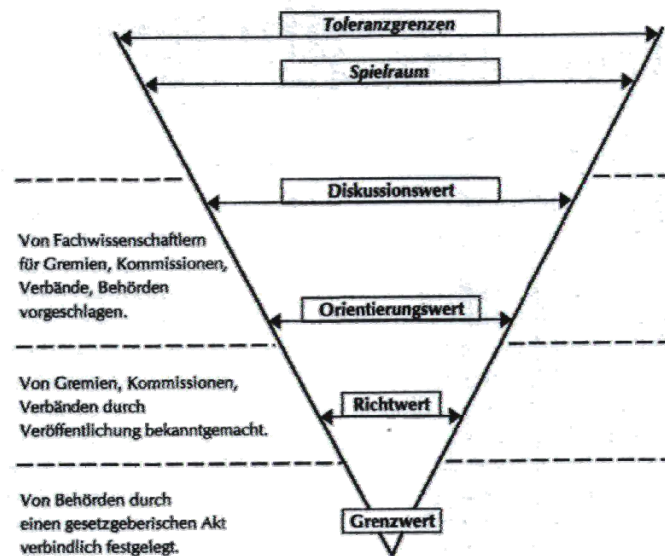


Abbildung 2: Bewertungsmaßstäbe, Kategorien fachlicher Übereinkünfte und rechtlicher Verbindlichkeit (HÜLSBERGEN, 2003)

Bereits existierende Richt- und Grenzwerte sowie umfangreiche wissenschaftliche Vorarbeiten können bei der Ableitung von Zielwerten hilfreich sein. Der flächenbezogene N-Saldo stellt einen der am häufigsten verwendeten Indikatoren zum Stoffhaushalt landwirtschaftlicher Systeme dar. Dessen Zielwerte bewegen sich in einem Wertebereich von 25 bis 50 kg N ha<sup>-1</sup> und Jahr<sup>-1</sup> (HÜLSBERGEN, 2003).

Zum Energieeinsatz bzw. zur Energieeffizienz existieren bisher keine anerkannten Zielwerte. ECKERT & BREITSCHUH (1997) geben in ihrem Bewertungsverfahren als maximal tolerierbaren Energieeinsatz 15 GJ ha<sup>-1</sup> an, der Netto-Energieoutput sollte im Minimum 50 GJ ha<sup>-1</sup> betragen.

"Generell bleibt festzustellen, dass Zielwerte bisher nur für Teilbereiche verfügbar sind. Sie sind jeweils nur im Zusammenhang mit der zugrunde liegenden Methode anwendbar; eine Übertragung auf andere Methoden erfordert entsprechende Anpassungen. Noch zu wenig bearbeitet ist die Frage, welche Zielwerte regional (nach Standortbedingungen und Betriebstypen) differenziert werden sollten und mit welchen Verfahren dies überhaupt möglich ist“ (HÜLSBERGEN, 2003).

## 2.5 Energieaufwand in der Tierhaltung

Im letzten Jahrhundert ist der Verbrauch an Rohstoffen und fossiler Energie im Zuge der Intensivierung und Mechanisierung der Produktionstechniken (Maschinen-, Düngemittel- und Pflanzenschutzinsatz) im landwirtschaftlichen Bereich stetig angestie-

gen. Der Ertragszuwachs ist als nicht adäquat zu dem Energieeinsatz einzuschätzen (PIMENTEL ET AL., 1973). Daraus resultieren steigender Ressourcenverbrauch, Gefährdung der Nachhaltigkeit der Landbewirtschaftung und zunehmende Belastungen der Umwelt (KALK & HÜLSBERGEN, 1996b).

Der Anteil des Landwirtschaftssektors am Gesamtenergieverbrauch einer Nation liegt zwischen zwei und fünf Prozent (LEWIS & TATCHELL, 1979: 4,5 %; VINE & BATEMAN, 1981: 5 %; OHEIMB ET AL., 1987: 2 %; BOCKMANN ET AL., 1991: 5 %; HAAS & KÖPKE, 1994: 3,6 %; PINSTRUP-ANDERSEN, 1999: 5 %).

Im Bereich der tierischen Produktion liegen gegenüber der pflanzlichen Produktion vergleichsweise wenige Untersuchungen zum Energieaufwand vor (LÜNZER, 1997; VAN DASSELAAR & POTHOVEN, 1994; PROCE, 1986; REITMAYR, 1995; ABEL, 1997; REFSGAARD ET AL., 1998; RÖMER ET AL., 1999; BERG & SCHOLZ, 2000; CEDERBERG & MATTSSON, 2000; GRÖNROOS ET AL., 2006). Die Energiebilanzierung der Tierhaltung ist dabei grundsätzlich erheblich komplexer. "Allgemein anwendbare Methoden fehlen noch, ebenso wie einheitliche Allokationsregeln bei der Bewertung von Kuppelprodukten" (WECHSELBERGER, 2000).

Beim Vergleich verschiedener Studien zum Thema Energieaufwand in der Tierhaltung (ABEL, 1997; BOCKISCH, 2000; RÖMER ET AL., 1999) ist ersichtlich, dass deren Angaben zum Energieaufwand teilweise inhomogen sind.

Ursachen dafür sind unterschiedlich gewählte Systemgrenzen und Daten sowie eine Vielzahl von Abschätzungen und Annahmen. Als Ergebnis dieser Studien ist allgemein festzuhalten, dass der Energieaufwand in der Milchviehhaltung für die Bereitstellung der Futtermittel anteilig am höchsten ist. Unterstützt wird diese Aussage durch BERG & SCHOLZ (2000).

Im Vergleich der Studien ergibt sich ein jeweils unterschiedlich hoher Gesamtenergieaufwand im Bereich der Milchproduktion (Tabelle 2). Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, dass sich die verschiedenen Kalkulationen auf unterschiedliche Niveaus der Milchleistung der Tiere beziehen. Weitere Unterschiede bestehen im Untersuchungszeitraum. So beziehen sich die Kalkulationen von BOCKISCH (2000) auf den Zeitraum der Zwischenkalbezeit und vernachlässigen die Kälber- und Jungrinderaufzucht. Der Bereich Nachzucht bleibt in den meisten Berechnungen, beispielsweise bei CEDERBERG & MATTSSON (2000), GRÖNROOS ET AL. (2006), REFSGAARD ET AL. (1998) unberücksichtigt. Die Nutzungsdauer der Tiere wird ebenfalls nicht betrachtet. Der Fokus wird hauptsächlich auf

den Bereich der Futtermittelproduktion gelegt. Die Gebäude und Maschinen, die in der Tierhaltung benötigt werden, finden lediglich in den Berechnungen von BERG & SCHOLZ (2000) und teilweise von REFSGAARD ET AL. (1998) Berücksichtigung. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass beispielsweise die Berechnungen von CEDERBERG & MATTSSON (2000) bereits die Allokation des Energieaufwands auf die Produkte Milch und Fleisch enthält.

Tabelle 2: Kumulierter Energieaufwand der Milchproduktion

<b>Autor(en)</b>	<b>Energieaufwand (MJ/kg Milch)</b>	<b>Milchleistung (kg Kuh<sup>-1</sup> und Jahr<sup>-1</sup>)</b>
Abel, H. J. (1997)	4,8	7.000
Refsgaard et al. (1998)	3,3	7.300
Refsgaard et al. (1998)	2,1 (ökologisch)	6.950
Römer, A. et al. (1999)	4,7	7.000
Berg, W.; Scholz, V. (2000)	3	6.600*
Bockisch, F. J. (2000)	2,7	6.182
Cederberg, Ch.; Mattsson, B. (2000)	3,5	7.813
Cederberg, Ch.; Mattsson, B. (2000)	2,5 (ökologisch)	7.127
Grönroos, J. et al. (2006)	4,3	7.700

\* persönliche Mitteilung

Vor diesem Hintergrund ist die Auswahl eines Wertes für den benötigten Energieaufwand für die Erzeugung eines Kilogramms Milch nur als grobe Annäherung möglich.

## 2.6 Ökobilanzierung landwirtschaftlicher Systeme

Bewertungen von Herstellungsprozessen verschiedener Güter werden seit einigen Jahren unter dem Aspekt der Ökobilanzierung (LCA) vorgenommen. "Die Ökobilanzierung (LCA) ist ein Werkzeug, das zur Bewertung der möglichen Auswirkungen eines Produktes, eines Verfahrens oder einer Tätigkeit auf die Umwelt im Verlauf seiner gesamten Lebenszeit (Life cycle) verwendet wird, wobei die Verwendung bestimmter Ressourcen quantitativ bemessen wird ("Inputs", wie zum Beispiel Energie, Rohstoffe, Wasser) und die Emissionen in die Umwelt ("Outputs" in die Luft, ins Wasser und den Boden) beurteilt werden, die mit dem untersuchten System in Verbindung zu bringen sind." (QUELLE 3)

Der Begriff "Ökobilanz" deutet bereits darauf hin, dass zur ökologischen Bewertung von Produktionsverfahren eine alt bewährte Vorgehensweise der Wirtschaft genutzt wird - die Bilanz.

Eine Ökobilanz umfasst die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung und die Auswertung der Ergebnisse. Eine Abwandlung der Ökobilanz ist die Sach-Ökobilanzierung. Darin müssen die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, die Sachbilanz und die Auswertung der Ergebnisse enthalten sein (ISO 14040, 1997).

Der Herstellungsprozess von Produkten erfordert im Allgemeinen den Einsatz von Ressourcen in unterschiedlichstem Umfang. Dazu ist eine umfassende Bewertung erforderlich. Jedoch gibt es keine Ökobilanz, die den gesamten Lebensweg eines Produktes lückenlos und einwandfrei erfasst. Für eine vollständige Bilanz müssten alle Auswirkungen eines Produktes auf die Ökosysteme und nahezu der ganzen Welt einbezogen werden (SIEBERS, 1997). BACCINI & BADER (1996) beschreiben die Ökobilanzierung wie folgt: "Der Begriff Ökobilanz kombiniert auf knappste Art zwei Grundbedürfnisse unserer Gesellschaft. Das Kürzel "Öko" symbolisiert den umfassenden Ansatz zu einer ökologisch orientierten Weltanschauung. Der Begriff "Bilanz" verspricht "facts and figures" und stützt sich auf die analoge Finanzbuchhaltung, die bewährt, eindeutig und arithmetisch richtig sein soll."

Aus einer umfangreichen Literaturrecherche im Bereich Ökobilanzierung mit speziellem Schwerpunkt auf die Allokation der eingesetzten Ressourcen auf das jeweilige Produkt geht hervor, dass bisher keine einheitliche Lösung existiert. Das Problem der Allokation ist noch immer eines der ungelösten fundamentalen Probleme in der Ökobilanzierungsmethodik (DE HAES & DE SNOO, 1996). Die Diskussion zur Allokation der eingesetzten Ressourcen bzw. entstehender Auswirkungen ist in der Ökobilanzierung aufgrund deren Einflusses oder auch der Bestimmung der Bewertung von sehr hoher Bedeutung (WEIDEMA, 2001). Es gibt viele methodische Untersuchungen zur Allokation von ökologischen Folgen auf einzelne Produktionsprozesse von Mehrproduktionssystemen (multifunktionale Prozesse) (FRISCHKNECHT, 2000; SCHNEIDER 1996; LINDFORS ET AL. 1995).

Die Sachbilanz ist ein Bestandteil der Ökobilanz (ISO 14040, 1997). Sie umfasst die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges und beruht darauf, die Verfahrensabschnitte innerhalb eines Produktsystems durch einfache Material- und Energieflüsse mitein-

ander zu verbinden. Allokationsverfahren sollten deshalb so genau wie möglich solchen grundlegenden Input- und Output-Beziehungen oder -Kennwerten entsprechen. Allokation ist die Zuordnung der Input- und Outputflüsse eines Verfahrensabschnittes auf das untersuchte Produktsystem. Es ist die Aufteilung und Einteilung vom Ressourceneinsatz (z. B. Eingaben und Ausgaben) in Multiproduktprozessen. Allokationsergebnisse eines "multi-output process" in Ökobilanzierungsuntersuchungen hängen von der Definition des Anlagenprozesses ab und variieren mit der Tiefe der Studie (KIM & OVERCASH, 2000). "A multi-output manufacturing site in life cycle assessment studies is a process by which two or more products/functions are delivered ... Since life cycle assessment study usually focuses on only one product/function, the responsibility of the environmental loadings associated with a multi-output process should be allocated to each product/function by a proper procedure, which is called as a multi-output allocation."

In der LCA wird eine Lösung gesucht, die so nah wie möglich alle äußeren Konsequenzen von einem potenziellen Wechsel des Aufwandes für ein Kuppelprodukt erfasst (WEIDEMA, 2001). EKVALL (1999) schlägt ein Allokationsverfahren vor, das unterschiedliche Allokationsnäherungen anwendet und somit in Abhängigkeit der Bedeutung des Allokationseffektes auf eine Entscheidung gezielt genutzt werden kann.

Der internationale Standard zur "Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz", ISO 14041 (1998) hat sich bewährt. Es enthält ein Drei-Schritt-Verfahren, das versucht, die erwähnten methodischen Unterschiede zu reduzieren. In der Literatur wird über die Möglichkeit der Vermeidung der Kuppelproduktzuteilung diskutiert. In diesem Zusammenhang wird von der Ausweitung der Betrachtungsebene des zu bewertenden Systems gesprochen (HUPPES, 1994). Diese Ausdehnung soll die überwiegende Vergleichbarkeit von Produktionssystemen mit multiplen Produkten ermöglichen. Hierbei wird beispielsweise die Produktion von einem Kuppelprodukt separat betrachtet und berechnet. Der ermittelte äquivalente Aufwand wird dann vom Aufwand des Hauptproduktes subtrahiert.

Der methodische Ansatz der Systemausdehnung findet einen bedeutenden Platz in den Verfahren der ISO 14041, in welcher zu lesen ist: "Schritt 1: Wo auch immer möglich, sollte eine Allokation vermieden werden durch: 1) Teilung der betroffenen Module in zwei oder mehrere Teilprozesse und Sammlung der Input- und Outputdaten bezogen auf diese Teilprozesse; 2) Erweiterung des Produktionssystems durch Aufnahme zusätzlicher Funktionen, die sich auf Koppelprodukte beziehen ..." Die Vermeidung der Zutei-



lung auf die verschiedenen Produkte wird als zu bevorzugende Möglichkeit gesehen, da es generell als nicht möglich angesehen wird, das System in jedem Fall auszudehnen (WEIDEMA, 2001).

Besteht nicht die Möglichkeit, die Allokation zu vermeiden, wird laut ISO 14041 Folgendes empfohlen: "Schritt 2: Wenn eine Allokation nicht vermieden werden kann, sollten die Systeminputs und -outputs zwischen ihren unterschiedlichen Produkten oder Funktionen so zugeordnet werden, dass die zugrunde liegenden physikalischen Beziehungen zwischen ihnen widergespiegelt werden; d. h., diese müssen die Art und Weise widerspiegeln, in der sich Inputs und Outputs durch quantitative Änderungen in den vom System gelieferten Produkten oder Funktionen verändern. Die sich ergebende Allokation wird nicht notwendigerweise auf eine naheliegende Größe wie Masse oder molarer Fluss von Koppelprodukten abgestützt."

Schritt 3 gibt Auskunft über das Allokationsverfahren, wenn keine physikalischen Grundlagen zur Allokation herangezogen werden können: "... sollten die Inputs zwischen den Produkten und Funktionen so zugeordnet werden, dass sich darin andere Beziehungen zwischen ihnen widerspiegeln werden ..." (ISO 14041, 1998).

## **2.7 VDI-Richtlinie 4600: Kumulierter Energieaufwand**

Um möglichst umfangreiche Informationen für eine unter dem Aspekt Umweltverträglichkeit optimierte Konstruktion und Fertigung der Produkte bereitzustellen, gewinnt die Quantifizierung und Analyse von Produkten und Dienstleistungen unter Aspekten wie Aufwand und Ressourcenbelastung im Laufe der Technikbewertung und Technikfolgenabschätzung zunehmend an Bedeutung. Dazu gehören sowohl Energieaufwand als auch Emissionen.

Die VDI-Richtlinie 4600 trägt dazu bei, energietechnische Daten in einem einheitlichen Grundrahmen verfü- und vergleichbar zu machen. Sie beschränkt sich dabei auf den Teilaspekt der Bilanzierung des Kumulierten Energieaufwandes, der unter anderem bei der Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse (LCA) ein wichtiger Kennwert für eine ökologische Bewertung des jeweils betrachteten Systems sein kann. Der kumulierte Energieaufwand ermöglicht die energetische Beurteilung und den Vergleich von Produkten und Dienstleistungen. Da nicht jedes Detail vorgeschrieben wird, bestehen Möglichkeiten zur methodischen Weiterentwicklung des Schemas.

Bei der Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes für Produkte und Dienstleistungen erhält man eine Basis für die Berechnung bzw. Hinweise auf:

- die damit verbundenen Materialaufwendungen,
- die Wahl der Werkstoffe und der Prozesstechnik unter energetischen Gesichtspunkten,
- die energetische Bedeutung der Behandlung benutzter Güter durch Teil-, Komponenten- oder Stoffrückführung, energetische Nutzung und Entsorgung,
- den Einfluss der Nutzungsdauer energieverbrauchender oder umwandelnder ökonomischer Güter (Produkte und Dienstleistungen) unter energetischen Gesichtspunkten,
- mit Energieumwandlungen bei Herstellung, Betrieb und Beseitigung verbundenen Emissionen.

## **2.8 Grundlagen aus der Tierernährung**

Für das Verständnis der Energieumwandlung im Prozess der Tierproduktion werden Ausführungen zu ernährungsphysiologischen Vorgängen im Tier gemacht. Energie wird durch Verbrennung der organischen Substanz von Futtermitteln freigesetzt. Die beim Verbrennen frei werdende Energie wird als Bruttoenergie oder auch Gesamtenergie (GE) bezeichnet. Die Gesamtenergie steht den Tieren bei der Vorlage des Futtermittels zur Verfügung. Mit den energetischen Umsetzungen im Körper verlassen bestimmte Anteile an Energie in Abhängigkeit der Verdaubarkeit und Umsetzbarkeit der Futtermittel bspw. in Form von Wärme den Produktionskreislauf. Ein Anteil der Energie wird mit dem Kot wieder ausgeschieden und steht somit dem weiteren Produktionsweg nicht mehr zur Verfügung. Der Energieanteil, der nicht ausgeschieden wird, passiert den Magen-Darm-Kanal, gilt somit als verdaut und wird als verdauliche Energie (DE) bezeichnet. Ein Teil der verdaulichen Energie wird mit dem Harn ausgeschieden. Ein weiterer Anteil der Energie wird bei der Vergärung durch Mikroorganismen in Methan umgewandelt. Die im Körper verbleibende Energie wird als umsetzbare Energie (ME) bezeichnet, da sie für die Erhaltung des Tieres und weitere Umsetzungen in Leistung zur Verfügung steht. Da bei allen Umsetzungen im Körper Wärme frei und vom Körper abgestrahlt wird, verlässt somit weitere Energie das Produktionssystem. Subtrahiert man diesen Anteil für Wärmeverluste von der umsetzbaren Energie, so erhält man die Nettoenergie (NE). Sie umfasst den Anteil der Futterenergie, der zur Erhaltung der Tiere und für die erbrachten Leistungen dient (KIRCHGEßNER, 2004; SPIEKERS & POTTHAST, 2004). Der NEL-Gehalt von Futtermitteln errechnet sich nach Gleichung (1):

$$\text{NEL (MJ)} = 0,6 (1 + 0,004 (q - 57)) \text{ ME (MJ)} \quad (1)$$

q = Umsetzbarkeit der Energie

$$q = \frac{\Delta \text{ME}}{\Delta \text{GE}} \quad (2)$$

Die Bruttoenergie wird mit der nachfolgenden Gleichung (3) aus den Rohnährstoffen errechnet. Die Koeffizienten spiegeln die kalorimetrischen Brennwerte der einzelnen Nährstoffgruppen wieder (KIRCHGESSNER, 2004).

$$\text{GE} \left( \frac{\text{MJ}}{\text{kg TM}} \right) = 0,0239 \text{ XP} + 0,0398 \text{ XL} + 0,0201 \text{ XF} + 0,0175 \text{ XX} \quad (3)$$

Die verdauliche Energie wird mithilfe der verdaulichen Rohnährstoffe ermittelt. Sie ergibt sich aus der Differenz zwischen Nährstoffmenge im Futter und Nährstoffmenge im Kot. Die in Prozent ausgedrückte Verdaulichkeit wird vielfach auch als Verdauungsquotient (VQ) oder Verdauungskoeffizient (VK) bezeichnet. Die Verdaulichkeit des Futtermittels ist jedoch als keine konstante Größe zu sehen. Sie wird von verschiedenen Faktoren wie Futtermenge, Tierart, Rationszusammensetzung und Zubereitung der Futtermittel beeinflusst.

*Rationszusammenstellung:* Das NEL-System berücksichtigt verschiedene Erkenntnisse aus Stoffwechselexperimenten mit Milchkühen über den Zusammenhang zwischen Nahrungsenergie und tierischer Leistung (KIRCHGESSNER, 2004).

Die Höhe der Futteraufnahme und die Zusammensetzung des Futters haben einen entscheidenden Einfluss auf die tägliche CH<sub>4</sub>-Emission der Wiederkäuer. Bezogen auf ein kg Trockensubstanz schwanken die Angaben über die CH<sub>4</sub>-Bildung zwischen 12 und 36 g. Im Mittel variiert die CH<sub>4</sub>-Bildung zwischen 20 und 25 g je kg Trockensubstanzaufnahme (FLACHOWSKY & BRADE, 2007). Hohe Anteile verschiedener Nährstoffe verursachen Extremwerte. Eine niedrige CH<sub>4</sub>-Menge wird vor allem bei stärke- und fettreichen Rationen und eine hohe CH<sub>4</sub>-Bildung bei faserreichen Rationen gemessen. MILLS ET AL. (2001) berichten von einem Anstieg der CH<sub>4</sub>-Produktion bei höherer Futteraufnahme, bezogen auf die Bruttoenergie- oder die Trockenmasseaufnahme fiel der CH<sub>4</sub>-Anteil jedoch von ~ 7 auf ~ 6 % ab (Abbildung 3).

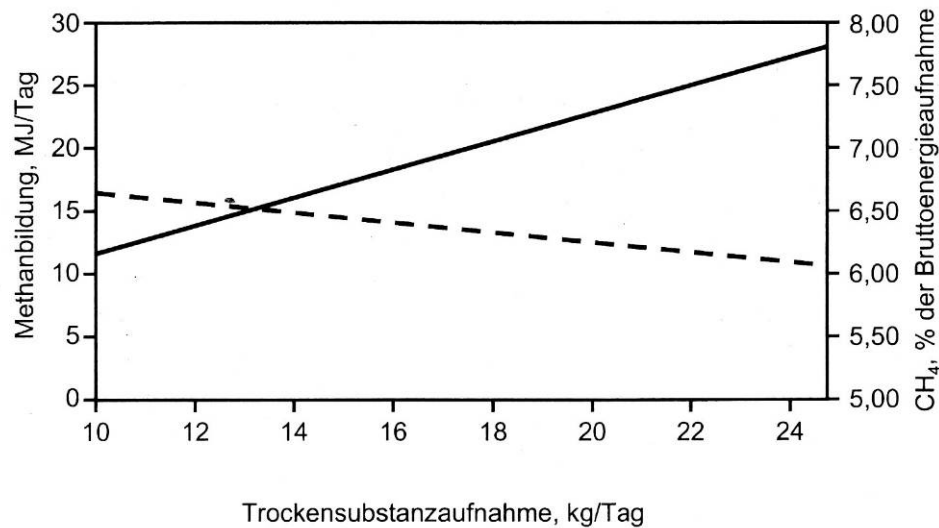


Abbildung 3: Einfluss der Höhe der Futteraufnahme auf die tägliche Methanbildung bzw. die Methanausscheidung in Prozent zur Bruttoenergieaufnahme (Ration 50 % Grassilage, 50 % Kraftfutter; (-) Methan; (---) Methan in % der Bruttoenergie (MILLS ET AL., 2001))

## 2.9 Energieaufwand für die Sojaerzeugung und -bereitstellung

Ein häufig in der Milchviehfütterung eingesetztes Futtermittel ist das Sojabohnenextraktionsschrot. Das geltende Futtermittelrecht definiert Sojabohnenextraktionsschrot, kurz Sojaschrot genannt, als Nebenerzeugnis, das bei der Ölgewinnung durch Extraktion aus Sojabohnen anfällt. Entscheidende Verfahrensabschnitte bei der Herstellung von Sojaextraktionsschrot sind Anbau und Verarbeitung der Sojabohnen, aber auch der Transport, da in Deutschland verfütterte Sojabohnen zu 60 % aus den USA und etwa 40 % aus Südamerika als Rohstoff importiert werden. Der Anbau der Sojabohnen ist vergleichbar mit dem von Getreide. Das Produktionsverfahren beginnt mit der Bodenbearbeitung und Saatbettvorbereitung und geht über Aussaat, Düngung, Behandlung mit Pflanzenschutzmitteln bis hin zur Ernte und dem Transport vom Feld. KIM & DALE (2004) ermittelten für den Anbau von Sojabohnen einen kumulierten Energieaufwand von 1,98 bis 2,04 MJ/kg. Der indirekte Energieaufwand für die im Anbau eingesetzten Maschinen, der Verarbeitungsprozess zu Sojabohnenextraktionsschrot und der Transport sind dabei nicht berücksichtigt. In der Datenbank Globales Emissions-System (GEMIS, 2006) wird für den Anbau von Sojabohnen ein Energieaufwand von 1,45 MJ kg<sup>-1</sup> angegeben. Für die Bereitstellung von Sojabohnenextraktionsschrot wird ein Energieaufwand von 4,25 MJ kg<sup>-1</sup> ausgewiesen. Dieser Wert beinhaltet den direkten Energieaufwand für den Anbau von Sojabohnen und die Verarbeitung der Sojabohnen

zu Sojaschrot in der Fabrik, jedoch nicht den Transport. Ein in GEMIS veranschlagter Wert für Anbau, Verarbeitung und Transport von Sojaextraktionsschrot beträgt  $5,44 \text{ MJ kg}^{-1}$ . Die Angaben für die Bereitstellung von Sojaextraktionsschrot variieren stark.

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Erläuterung und Stand zu REPRO

REPRO ist so konzipiert, dass die innerbetrieblichen Stoff- und Energiebilanzen hinreichend genau abgebildet werden können (Abbildung 4). Es werden nicht nur die In- und Outputs über die Betriebsgrenze analysiert, sondern die wichtigsten Produktströme zwischen Pflanzenbau und Tierhaltung, stoffliche Veränderungen (bspw. Futterkonservierung, Düngeraufbereitung) und ausgewählte Emissionen (bspw. Nitrat, Methan) bewertet. Der Stoffkreislauf Boden - Pflanze - Tier - Boden verbindet alle Betriebszweige miteinander. An die Stoffflüsse sind Energieflüsse geknüpft, die in die Energiebilanzierung eingehen (Hülsbergen, 2003).

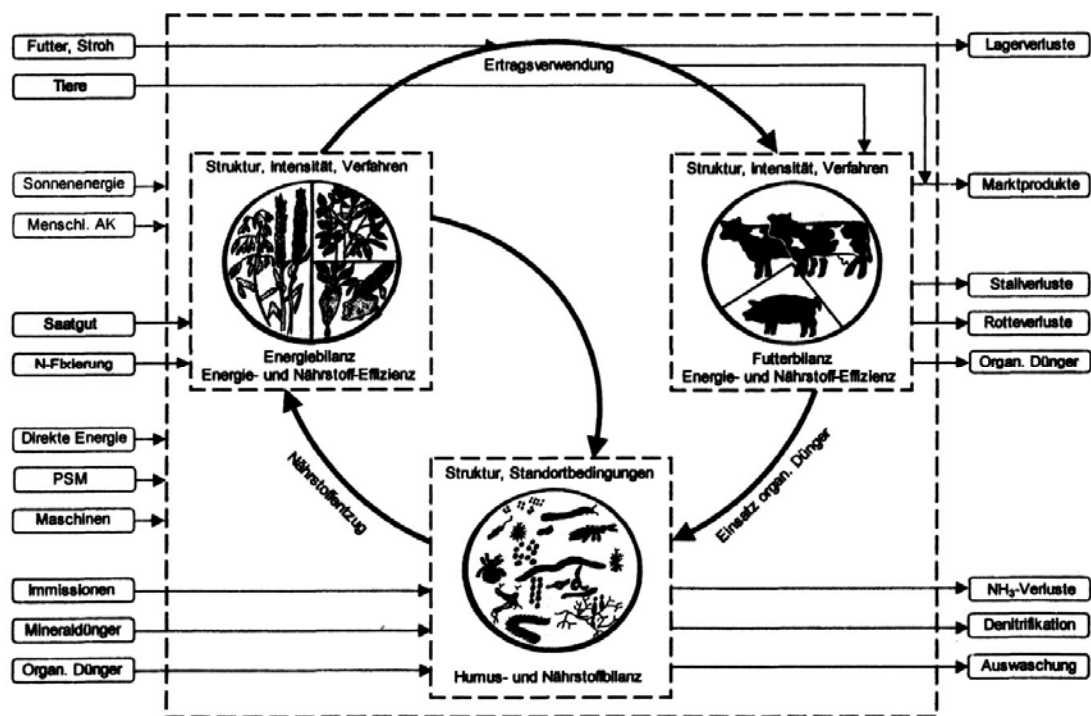


Abbildung 4: Vernetzte Stoffflüsse im Modell REPRO (HÜLSBERGEN, 2003)

Die Bereiche Pflanzenbau und Tierhaltung sind im Modell REPRO energetisch gekoppelt. Ausgehend von den pflanzlichen Primärprodukten werden die Futterkonservierungsverfahren analysiert und das Aufkommen an Futterstoffen berechnet. Das ermöglicht die Ausweisung der Energieeffizienz wahlweise je Ausgangsprodukt (Originalsubstanz eines Futterstoffes) oder Endprodukt (Konservat). Beim Endprodukt sind die zusätzlichen Arbeitsgänge der Konservierung einbezogen. Futterstoffe unterschiedlicher Teilschläge mit gleichen Qualitätsmerkmalen werden zusammengefügt. Sie stellen

energetische Eingangsgrößen der Tierhaltung dar. Ausgehend vom fütterungs- und leistungsabhängigen Exkrementanfall in der Tierhaltung wird unter Berücksichtigung der Verfahrensgestaltung das Aufkommen an organischen Düngestoffen berechnet. Die erzeugten organischen Dünger werden ausgehend von ihrer stofflichen Zusammensetzung energetisch bewertet (HÜLSBERGEN, 2003).

Das Modell REPRO erweist sich als besonders zweckmäßig für die vorliegenden Untersuchungen, da es im Gegensatz zu anderen Indikatorenmodellen Wechselwirkungen zwischen einzelnen Systemkomponenten berücksichtigt.

Die gewählten Systemgrenzen zum Modell REPRO beginnen in diesem Forschungsvorhaben bei der Entnahme des Futters aus dem Lager, wobei auch das Lager einer energetischen Bewertung unterzogen wird. Es wird vorausgesetzt, dass wirtschaftseigene Futtermittel bis zur Einlagerung bereits in REPRO erfasst sind. Ausnahmen bei der gesetzten Systemgrenze bildet Soja. Für Soja erfolgt die Ermittlung des Energieaufwands für Erzeugung und den Transport gesondert. Gründe für diese Ausnahmeposition sind erstens die bisher sehr unsicheren Angaben zum energetischen Aufwand der Produktion und zweitens die langen Transportwege, die häufig zur Diskussion stehen.

Ein weiterhin zu analysierender Bereich ist das Haltungssystem. Es beinhaltet die Verfahrensabschnitte Fütterung, Haltung, Entmistung, Klimatisierung und Produktgewinnung, hier beispielhaft die Milchgewinnung und -lagerung. Die Systemgrenzen enden, wenn die Produkte den Betrieb verlassen (Milch, Tierverkauf) oder genutzt werden (Wirtschaftsdünger). Das bedeutet, das Exkrementlager sowie die Einlagerung der Exkremente werden bewertet. Die Entnahme sowie Ausbringung der Exkremente befinden sich außerhalb der Systemgrenzen. Damit werden die in REPRO bereits enthaltenen Informationen ergänzt und der Betriebskreislauf wird bezüglich der energetischen Betrachtung geschlossen.

### **3.2 Systemgrenzen Energiebilanzierung**

Der Anspruch der entwickelten Methode zur Energiebilanzierung besteht darin, dass sich neben der umfassenden Analyse des kompletten Verfahrens auch einzelne Verfahrensabschnitte beurteilen und verändern lassen. Neben verfahrensumschließenden Parametern je Produkt (bspw. Fleisch, Milch) erfolgen detaillierte Prüfungen der unterschiedlichen Parameter in einzelnen Verfahrensabschnitten.

Die Energiebilanzierung in der Tierhaltung erfolgt in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4600 zum kumulierten Energieaufwand und umfasst die direkte und indirekte Energie,

die in das Verfahren einfließen. Der kumulierte Energieaufwand stellt die Summe der kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung ( $KEA_H$ ), die Nutzung ( $KEA_N$ ) und die Entsorgung ( $KEA_E$ ) des ökonomischen Gutes dar (Gleichung (4)).

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E \quad (4)$$

Für die Entsorgung der Maschinen ist der empfohlene Energieaufwand von  $KEA_E = 0,5 \text{ MJ kg}^{-1}$  Maschine in den Berechnungen enthalten (SCHOLZ & KAULFUSS, 1995). Der Energieaufwand für die Entsorgung von Verbrauchsgütern ist vernachlässigt, weil diese Materialien völlig umgesetzt oder aufgebraucht werden und keine Details diesbezüglich verfügbar sind.

Die Kalkulationen beschränken sich auf den Einsatz fossiler Energie, die Methode ist jedoch auch für den Einsatz erneuerbarer Energie anwendbar. Die menschliche Arbeitskraft (bspw. Maschinenbedienung von Hand) bleibt in den Berechnungen unberücksichtigt. Methodische Ansätze zur energetischen Bewertung der menschlichen Arbeit existieren zwar (FLUCK, 1992), jedoch differieren deren Energieäquivalente stark und sollten auch an die Bedingungen der Untersuchungsregionen angepasst werden. Nicht Bestandteil der energetischen Bilanzierung ist hierbei weiterhin die metabolische Energie (z. B. Nährwert von Futtermitteln), die Sonnenenergie und Umweltenergie (z. B. natürliche Beleuchtung oder Beheizung durch passive Nutzung von Solarenergie), Luft (z. B. Verbrennungsluft), Wasser (bspw. Kühlwasser, Tränkwasser) sowie Boden (bspw. Flächenbedarf für Anlagen, Gebäude, Futteranbaufläche).

Die Betrachtungsebene der Bilanzierung ist das Einzeltier. Durch Aggregation werden entsprechend der Tierart und Nutzung alle weiteren Ebenen abgeleitet. Übersicht 6 stellt die Definition des Produktsystems Tierhaltung dar. Ein Produktsystem ist eine Sammlung von Verfahrensabschnitten, die durch Flüsse von Zwischenprodukten miteinander verbunden sind und die eine oder mehrere definierte Funktionen ausführen (ISO 14041, 1998).

---

#### Übersicht 6: Definition des Produktsystems Tierhaltung

$$E = E_d + E_i \quad (5)$$

$$E = E_F(R) + E_N(RP) + E_P + E_{MtA} + E_G + E_K \quad (6)$$



Symbol	Maßeinheit	Bezeichnung
E	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieinput
E <sub>d</sub>	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	direkter Energieeinsatz
E <sub>i</sub>	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	indirekter Energieeinsatz
E <sub>F</sub>	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Futterbereitstellung
E <sub>N</sub>	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Nachzucht
E <sub>P</sub>	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Produktgewinnung
E <sub>MtA</sub>	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Maschinen und technische Ausrüstung
E <sub>G</sub>	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Gebäude und bauliche Anlagen
E <sub>K</sub>	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Klimatisierung

R = Rationszusammensetzung

RP = Reproduktionsrate

Der Einfluss der gewählten Rand- und Rahmenbedingungen ist bei der Analyse eines Produktionssystems sehr hoch. Die Systemgrenzen beeinflussen das Ergebnis der Untersuchungen erheblich. Daher ist es notwendig die Untersuchungen im Rahmen fest definierter Systemgrenzen durchzuführen.

Die Methodenentwicklung zur Energiebilanzierung in der Tierhaltung erfolgt am Beispiel der Milchviehhaltung. Dieses Produktionsverfahren wurde ausgewählt, weil es wirtschaftlich ein sehr bedeutender Zweig ist und aufgrund der Vielzahl der entstehenden Produkte höchste Ansprüche an die Bewertung von Verfahren der Tierhaltung stellt. Der Verfahrensabschnitt Nachzucht findet besondere Berücksichtigung bei der Energiebilanzierung. Weitere zu prüfende Parameter sind der Energieaufwand für die Fütterung, für die Milchgewinnung und -lagerung einschließlich Reinigung sowie alle das Haltungssystem betreffenden Parameter.

Entsprechend der allgemeinen Methode zur Energiebilanzierung in der Tierhaltung wurde für das spezielle Beispiel der Milchviehhaltung eine konkrete Anpassung des Produktsystems vorgenommen (Übersicht 7). Hierbei wurde der Verfahrensabschnitt Klimatisierung keiner energetischen Berechnung unterzogen, da von der Nutzung der freien Lüftung ausgegangen wird.

---

#### Übersicht 7: Definition des Produktsystems Milchviehhaltung

$$E = E_F(R) + E_N(RP) + E_P + E_{MtA} + E_G \quad (7)$$

Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung ( $E_F(R)$ )

$$E_F = E_{FW} + E_{FZ} \quad (8)$$

$$E_F = E_S + E_{MD} + E_{OD} + E_{PSM} + E_M + (E_T + E_V) \quad (9)$$

## Verfahrensabschnitt Nachzucht

$$E_N = E_F(R) + E_{MtA} + E_G + E_K \quad (10)$$

$$E_N = E_{KA} + E_{JV} \quad (11)$$

$$E_{KA} = E_{KF}(R) + E_{KMtA} + E_{KG} \quad (12)$$

$$E_{JV} = E_{JVF}(R) + E_{JVMtA} + E_{JVG} \quad (13)$$

## Verfahrensabschnitt Milchgewinnung

$$E_P = E_{MS} + E_{MK} + E_R \quad (14)$$

Symbol	Maßeinheit	Bezeichnung
$E_{KF}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Futterbereitstellung für Kälber
$E_{JVF}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Futterbereitstellung für Jungvieh
$E_{FW}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für wirtschaftseigene Futtermittel
$E_{FZ}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Zukauffuttermittel
$E_{KMtA}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Maschinen und technische Ausrüstung für Kälber
$E_{KG}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Gebäude für Kälber
$E_{JVMtA}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Maschinen und technische Ausrüstung für Jungvieh
$E_{JVG}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Gebäude für Jungvieh
$E_{MS}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Milchentzug
$E_{MK}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Milchkühlung
$E_R$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Reinigung
$E_{MtAFE}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Maschinen und technische Ausrüstung bei Futterentnahme
$E_{MtAFÜ}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Maschinen und technische Ausrüstung bei Fütterung
$E_{MtAH}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Maschinen und technische Ausrüstung bei der Haltung
$E_{MtAE}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Maschinen und technische Ausrüstung bei Entmistung
$E_{GFL}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Gebäude und bauliche Anlagen, Futterlager
$E_{GH}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Gebäude und bauliche Anlagen, Haltung
$E_{GEL}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Gebäude und bauliche Anlagen, Exkrementlager
$E_{KA}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Kälberaufzucht
$E_{JV}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz für Jungrinderaufzucht
$E_{KA}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz Kalb
$E_S$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz Saatgut
$E_{MD}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz Mineraldünger
$E_{OD}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz organischer Dünger
$E_{PSM}$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz Pflanzenschutzmittel
$E_M$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz Maschinen
$E_T$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz Transport
$E_V$	MJ Tier <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Energieeinsatz Verarbeitung

## Verfahrensabschnitt Maschinen und technische Ausrüstung

$$E_{MtA} = E_{MtAFE} + E_{MtAFÜ} + E_{MtAH} + E_{MtAE} \quad (15)$$

## Verfahrensabschnitt Gebäude und bauliche Anlagen

$$E_G = E_{GFL} + E_{GH} + E_{GEL} \quad (16)$$

Die Ermittlung des Energieaufwands erfolgt in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4600. Die Anpassung der VDI-Richtlinie 4600 zum kumulierten Energieaufwand an die Problematik der Energiebilanzierung in der Tierhaltung und speziell der Milchviehhaltung ist in Abbildung 5 dargestellt.

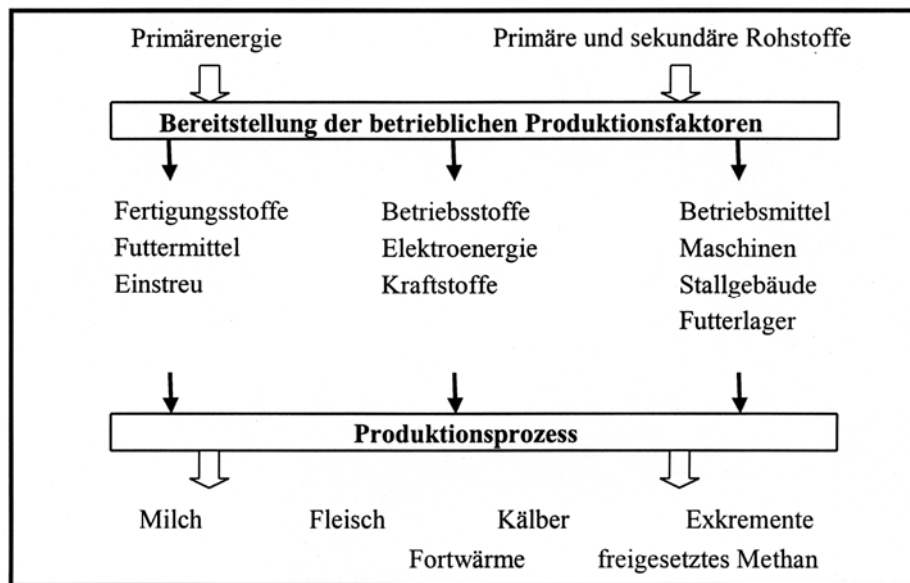


Abbildung 5: Schema der Energieflüsse im Verfahren Milchproduktion

### 3.3 Definition eines Standardverfahrens für die Milchviehhaltung

Für Szenariorechnungen wurde unter zukunftsorientierten Überlegungen ein Standardverfahren der Milchviehhaltung definiert.

Die durchschnittliche Milchleistung pro Kuh und Jahr betrug 2005 in Brandenburg 7.602 kg (STATISTISCHES JAHRBUCH, 2005) und deutschlandweit für das Jahr 2004 6.585 kg (STATISTISCHES JAHRBUCH, 2005). Aufgrund genetischer Weiterentwicklung und optimierter Fütterung ist in den letzten Jahren ein stetiger Anstieg der Milchleistung zu verzeichnen, wie beispielsweise von über 10.000 kg Milch Kuh<sup>-1</sup> und Jahr<sup>-1</sup>. Für das Standardverfahren ist eine Milchleistung von 8.000 kg definiert.

Die Entwicklung zu größeren Milchviehbeständen ist in Deutschland zur Erzielung eines ausreichenden Einkommens unter den derzeitigen Rahmenbedingungen unumgänglich.

Abbildung 6 stellt die Milchkuhhaltung nach Bestandsgrößenklassen der Jahre 1995, 1997, 1999, 2001 und 2003 dar. Die Gesamttierbestandszahlen nehmen seit 1999 (1995: 4.203.300 Milchkühe, 1997: 4.147.200 Milchkühe, 1999: 4.765.100 Milchkühe, 2001: 4.548.600 Milchkühe, 2003: 4.372.000 Milchkühe) ab. Dennoch steigt der Tierbestand pro Betrieb. Bestände bis 49 Tiere verlieren zunehmend an Bedeutung. Bedeutender sind Bestände mit 50 bis 99 Tieren, wobei auch hier ein abnehmender Trend zu erkennen ist. Eine stetige Zunahme ist in der Bestandsgrößenklasse 100 bis 199 festzustellen. Da zukünftig eine größere Anzahl Milchkühe in Beständen von 100 und mehr Tieren gehalten wird (GARTUNG & BEYERSDORFER, 2000), wurde für das Standardverfahren ein Tierbestand in dieser Größenordnung festgelegt.

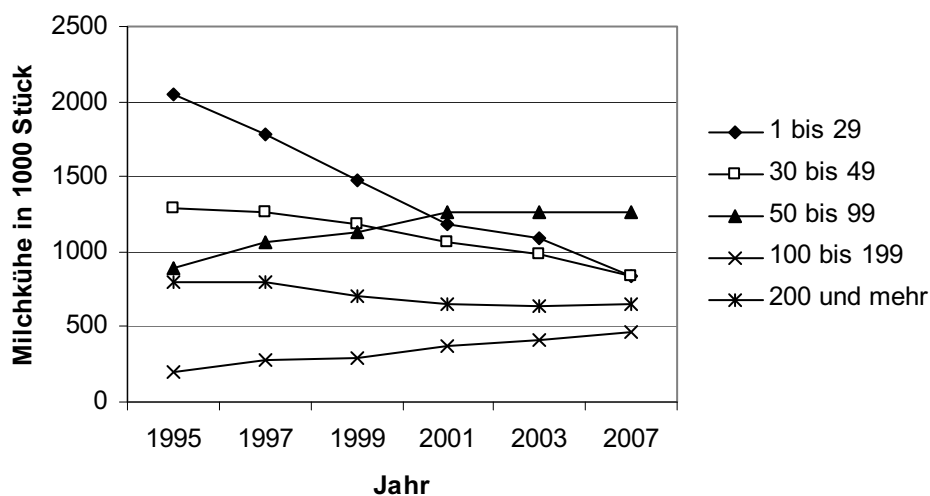


Abbildung 6: Milchkuhhaltung nach Bestandsgrößenklassen (Statistische Jahrbücher 1997, 1999, 2005 und 2008)

In Deutschland kommen zwei Haltungsverfahren für Milchkühe zum Einsatz, die Anbinde- und Laufstallhaltung. Diese Haltungsverfahren unterscheiden sich erheblich voneinander, weil sich daraus unterschiedliche Anforderungen an die Gestaltung der Funktionsbereiche und Arbeitsabläufe ergeben. "Unter Funktionsbereichen werden räumlich begrenzte Zonen verstanden, die vorrangig einer bestimmten Funktion dienen. In der Milcherzeugung sind die Funktionsbereiche Laufen, Liegen, Fressen und Melken zu berücksichtigen" (BÜSCHER, 2003). In der Anbindehaltung sind die Tiere am Standplatz fixiert. Bei dieser Haltungsform werden alle notwendigen Arbeiten zur Produktgewinnung und Tierbetreuung am Standplatz durchgeführt. Insgesamt ist dieses Haltungssystem rückläufig aufgrund des hohen arbeitswirtschaftlichen Aufwandes und der nicht artgerechten Haltung der Tiere. Der Liegeboxen-Laufstall ist zum Standard in der Milchviehhaltung Deutschlands geworden.

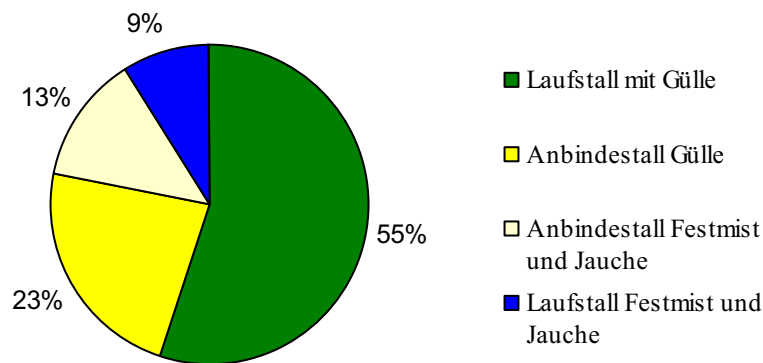


Abbildung 7: Milchviehhaltung in Ställen in Deutschland 2004 (4.282.005 Tiere)  
(STATISTISCHES BUNDESAMT, 2004)

Als Kompaktstall beherbergt der Liegeboxenlaufstall für bis zu 200 Tiere alle Funktionsbereiche in einem Stallgebäude. Bei größeren Tierbeständen wird das Melkhaus ausgelagert und der Tierbestand, meist nach Leistung oder Laktationsstadium gruppiert, in getrennten Stalleinheiten untergebracht (BÜSCHER, 2003). Mehr als drei Viertel der Milchkühe in Deutschland werden heute in Ställen mit Flüssigentmistung gehalten (Abbildung 7). Für das Standardverfahren wird daher ein Liegeboxenlaufstall mit Flüssigentmistung zugrunde gelegt.

Im Standardverfahren ist definiert, dass die Fütterung als Total-Misch-Ration (TMR) erfolgt. Die Verteilung erfolgt mit einem Futtermischwagen. Dabei werden die Grundfutterkomponenten zusammen mit dem Kraftfutter im Futtermischwagen zu einer einheitlichen Ration gemischt. Dieses Futtergemisch ist an den berechneten Bedarf der Tiere hinsichtlich Energie, Protein und Mineralstoffen angepasst. Dieses Fütterungsverfahren setzt größere Bestände voraus, um Leistungsgruppen bilden zu können. Die Herde wird hierbei nach Leistung in Gruppen eingeteilt. Für eine wiederkäuergerechte und bedarfsgerechte Versorgung der Milchkühe sind im Standardverfahren verschiedene Rationen berechnet worden. Es wurde eine Einteilung in laktierende Tiere und Trockensteher vorgenommen. Dabei werden die laktierenden Kühe in zwei Leistungsgruppen und die Trockensteher in die Phasen "Trocken" und "Vorbereitung" eingeteilt. Die Anforderungen der laktierenden Tiere variieren stark in Abhängigkeit von der Leistung, dem Laktationsstand und der Futteraufnahme. Die Versorgung der Milchkühe mit Energie, nutzbarem Rohprotein und Mineralstoffen muss gewährleistet sein. Zur Sicherstellung der Stickstoffversorgung der Pansenmikroben ist ergänzend die Ruminale N-Bilanz (RNB) einzustellen (SPIEKERS & POTTHAST, 2004).

Die Futterrationen des Standardverfahrens beinhalten die in der Milchviehfütterung wichtigsten Grundfuttermittel Gras- und Maissilage, aber auch Weidefutter und Kraftfuttermittel. Als Basisvariante wurde eine Standardration gebildet, welche zum Vergleich des kumulierten Energieaufwands mit davon abweichenden Rationen genutzt wird. Die Standardration beinhaltet eine halbtägige Weidefütterung im Sommer. Die anderen Futterrationen unterscheiden sich von der Standardration dadurch, dass in ihnen jeweils ein Rationsbestandteil maximiert wurde.

In Laufställen erfolgt die Milchgewinnung überwiegend in Melkständen. Die stärkste Verbreitung findet hierbei der Fischgrätenmelkstand (TRÖGER, 2003; PACHE, 2002; ORDOLFF, 1997). Für das Standardverfahren wird ein  $2 \times 8$  Fischgrätenmelkstand, das heißt ein Melkstand mit 2 mal 8 Melkplätzen in die Berechnungen aufgenommen. Die durchschnittliche Reproduktionsrate beträgt 44 % (LKV, 2006; LKV, 2007).

### **3.4 Ermittlung des Energieaufwands für die einzelnen Verfahrensabschnitte**

Die Ermittlung des Energieaufwandes zur Futterbereitstellung erfolgt unter Berücksichtigung des Energieaufwandes zur Herstellung der einzelnen Futtermittel. Der Energieaufwand zur Bereitstellung wirtschaftseigener Futtermittel wird anhand von REPRO (HÜLSBERGEN, 2003) berechnet. Dabei wird das gesamte Produktionsverfahren des Pflanzenbaus betrachtet. Dazu zählen die Verfahrensabschnitte Bodenbearbeitung, Saatbettbereitung, Aussaat, Düngung, Pflanzenschutzmitteleinsatz, Produkternte und Transport. Es wird sowohl der direkte als auch der indirekte Energieeinsatz berücksichtigt. Für Zukauffuttermittel, deren Energieaufwand nicht mit REPRO berechnet werden kann, werden die Werte zu deren spezifischem Energieaufwand anhand von GEMIS ermittelt. Der Energieaufwand zur Futterbereitstellung wird anhand unterschiedlicher Ertragsklassen und Futterrationen ermittelt. Standortbedingungen, Management und die Kombinationen individueller Faktoren beeinflussen die Ertragsbildung. Die Hauptfaktoren, welche den stärksten Einfluss auf die Ertragsbildung ausüben, sind Bodenqualität, klimatische Bedingungen, Wasserverfügbarkeit, Vegetationsart, Produktionsintensität und Nährstoffbereitstellung (N, P, K) (KÄDING ET AL., 2005).

Die Kalkulationen beziehen sich auf typische Pflanzenproduktionstechniken in Nordost-Deutschland auf flachen Feldern mit sandigen Böden sowie Niedermoorstandorten für Grünland. Um eine einfache Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Futtermittel zu erlangen, findet die Einteilung der Standortbedingungen in Beziehung zu Ertragsklassen

statt. Im Weiteren demonstrieren gleiche Ertragsklassen gleiche Standortbedingungen für den Anbau der Futtermittel.

### *Standortbedingungen*

Die Berechnungen des Produktionsprozesses Ackerbau basieren auf verschiedenen Standortbedingungen, die charakteristisch für Nord-Ost-Deutschland sind. Ausdehnungen der Systemgrenzen sind nur im Zusammenhang mit in Deutschland nicht verfügbaren Produktionsmitteln (bspw. Zukauffuttermittel) gegeben.

Berücksichtigt wird die Nutzung des Dauergrünlandes zur Futterproduktion für die Milchviehhaltung, die für diese Region zurzeit noch eine wichtige Flächennutzung darstellt. Allerdings verringert sich der Umfang seit einigen Jahren (TAUBE ET AL., 2003).

Die Einteilung der Ertragsklassen wurde aus der Datensammlung für die Betriebsplanung und betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg vom Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung des Landes Brandenburg entnommen (LVLF, 2005). Zur Charakterisierung der Standortbedingungen werden die Ertragsklassen des Ackerbaus generell hinsichtlich ihrer Ackerzahlen unterschieden. Danach wird folgende Einteilung der Ertragsklassen vorgenommen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Charakterisierung der Standortbedingungen in Nordost-Deutschland

Gruppe	Ackerzahl	Bodentyp	Geologische Entstehung
1	> 45	Lehmboden Hohe Wasserbindungskapazität und Absorption	d5, a12
2	36 bis 45	lehmgiger Sand	d4
3	29 bis 35	Sandboden (pleistozän)	d3
4	23 bis 28	Sandboden mit geringem Grundwasserstand, geringe Absorption	d1, d2

Eine Differenzierung der Ertragsbedingungen für die Verfahren der Grünlandnutzung anhand von Grünlandzahlen ist ungeeignet, da sich die Ertragsbedingungen durch die vielerorts erfolgten meliorativen Maßnahmen gegenüber dem Zeitpunkt der Grünland-schätzung stark verändert haben. Als Basis für die Berechnungen dient jeweils ein Niedermoorstandort (LVLF, 2005). Es wird zwischen vier Ertragsklassen der Nutzung von Grünland hinsichtlich der Erträge und des Anbaus unterschieden.

Drei der Ertragsklassen sind anhand ihrer Standortbedingungen definiert. Als erste Ertragsklasse werden überwiegend gut wasserregulierte, homogene Niedermoore, An-

moore und humose Sande definiert. Der Ertrag liegt hier bei  $90 \text{ dt TM ha}^{-1}$ . Für die zweite Ertragsklasse ist ein Ertrag von  $70 \text{ dt TM ha}^{-1}$  unterstellt. Typisch für diese Ertragsklasse sind überwiegend heterogene, stärker reliefierte Niedermoore bis humose Sande mit wechselnden Bodenwasserverhältnissen. Als dritte Ertragsklasse werden heterogene, stärker degradierte Niedermoore betrachtet. Der Ertrag liegt bei  $50 \text{ dt TM ha}^{-1}$ . Die vierte Ertragsklasse für Grünland beschreibt ein Verfahren der extensiven Bewirtschaftung mit einem Ertrag von  $50 \text{ dt TM ha}^{-1}$ . Das heißt in Ertragsklasse vier der Grünlandnutzung wird kein Dünger eingesetzt.

Allen Verfahren mit Düngung ist ausschließlich eine mineralische Düngung unterstellt. Dieses Vorgehen sichert eine leichte Nachvollziehbarkeit. Für alle Böden ist ein mittlerer Düngungsversorgungsgrad unterstellt.

Die für die Berechnungen verwendeten Trockenmassegehalte beziehen sich auf die Angaben in REPRO. Der Trockenmassegehalt für die Futtermittel ist wie folgt festgelegt: 28 % TM-Gehalt für Maissilage, 35 % TM-Gehalt für Grassilage, 85 % TM-Gehalt für Heu und 18 % TM-Gehalt für Weidegras.

Um herauszufinden, welche Futtermittel einen geringen kumulierten Energieaufwand begünstigen, werden unterschiedliche Total-Misch-Rationen für Milchvieh betrachtet. Ausgangspunkt des Vergleichs ist eine definierte Standardration (Ration 1). Typisch für die Standardration ist der ausgeglichene Anteil der Rationsbestandteile Grassilage, Maissilage, Weide und Kraftfutter. Die zum Vergleich gebildeten Futterrationen unterscheiden sich bezüglich der Standardration dahingehend, dass jeweils eins der Rationsbestandteile maximiert eingesetzt wird. Die hier durchgeführten Kalkulationen beziehen sich auf den in Futterwerttabellen (DLG, 1997) angegebenen Verdauungsquotienten der einzelnen Futtermittel. Diese Futterwerttabellen wurden verwendet, da sie repräsentative Werte enthalten und daher allgemein Verwendung finden.

Basierend auf einer Literaturrecherche wird der kumulierte Energieaufwand für den Verfahrensabschnitt Milchgewinnung ermittelt. Die Bereiche Milchentzug, Milchkühlung sowie Reinigung und Desinfektion werden in diesem Zusammenhang hinsichtlich ihres direkten Energieaufwandes, im Besonderen hinsichtlich des Elektroenergieaufwands und des indirekten Energieaufwandes der technischen Ausrüstung untersucht. Die Kalkulationen basieren auf einer Nutzungsdauer von 12 Jahren für die technische Ausrüstung. Der Energieaufwand wurde auf der Grundlage des Gewichts der einzelnen



Bestandteile und dem spezifischen kumulierten Energieaufwand der Materialien berechnet.

In der Literatur wird der Elektroenergiebedarf üblicherweise als spezifischer Wert auf die Anzahl der Tiere bezogen. Sowohl CLAUSEN (2000) als auch JÄKEL (2003) stellten während ihrer Untersuchungen fest, dass diese Bezugsgröße als Vergleichswert wenig geeignet ist. Vielmehr sollte die produzierte Milchmenge herangezogen werden, weil hiermit die tatsächlich den Elektroenergieaufwand beeinflussende Größe (die ermolkene und zu kühlende Milchmenge) die Basis darstellt.

Die Bewertung der Intensität und Umweltverträglichkeit der Landbewirtschaftung mithilfe von Energiebilanzen erfordert die Einbeziehung des Energieinputs von Investitionsgütern (KALK & HÜLSBERGEN, 1996A). Dazu zählen die betrieblichen Gebäude und baulichen Anlagen. Anhand des Standardverfahrens (vgl. Abschnitt 3.2) wurden verschiedene Stallgebäude und ihre Bestandteile hinsichtlich des Energieaufwandes analysiert. Die Berechnung des kumulierten Energieaufwandes der Stallgebäude erfolgt unter Berücksichtigung einer Nutzungsdauer von 25 Jahren (BSTBL, 1996). Unterschiede bestehen in den Gebäudehüllen, dazu zählen Wände, Stützen und das Dach. Ebenfalls wurde ermittelt, welchen Einfluss die Stallfußbodengestaltung auf den kumulierten Energieaufwand ausübt, daher wurde der Energieaufwand für jedes Gebäude mit und ohne Spaltenboden und Güllekanälen ermittelt. Die Betrachtung der verschiedenen Gebäudebestandteile erfolgt separat. Diese strikte Trennung ist aufgrund der unterschiedlichen Materialien notwendig, da zur Berechnung des Energieaufwandes die Masse der einzelnen Baustoffe mit deren spezifischem Energieaufwand multipliziert wird.

Die Berechnung des Energieaufwandes erfolgt unter Nutzung der Datenbank GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme). GEMIS bietet Bilanzierungs- und Analysemöglichkeiten für Lebenszyklen von Energie-, Stoff- und Transportprozessen sowie ihrer beliebigen Kombination. Es umfasst Grunddaten von Energieträgern (Prozessketten- und Brennstoffdaten) sowie verschiedener Technologien zur Bereitstellung von Wärme und Strom. In der Datenbasis sind auch Prozesse enthalten, die Stoffe bereitstellen (GEMIS, 2006).

Zu den Investitionsgütern zählt auch die technische Ausrüstung des Gebäudes. Diese wurde ebenfalls für das Standardverfahren energetisch bewertet. Die Kalkulationen basieren auf einer Nutzungsdauer von 12 Jahren für die technische Ausrüstung, nur für

Gummiliegematten oder Sand als Liegeboxenmaterial wird eine Nutzungsdauer von 8 beziehungsweise 3 Jahren angenommen.

Der kumulierte Energieaufwand für die Nachzucht beinhaltet die Bereiche Futterbereitstellung, Gebäude und bauliche Anlagen, Maschinen und technische Ausrüstung sowie den Elektroenergieaufwand. Für den Bereich Futterbereitstellung werden die gleichen Bedingungen vorausgesetzt wie im Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung für das Milchvieh. Zusätzliche energetische Kennzahlen für Milch und Milchaustauscher wurden mit GEMIS ermittelt. Bezogen auf GEMIS beträgt der kumulierte Energieaufwand für Kolostralmilch 4,78 MJ pro kg und für Milchaustauscher 76,47 MJ pro kg.

### 3.5 Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens unter Einfluss der Reproduktionsrate

Zur Beurteilung der Energieintensität im Milchproduktionsverfahren wurden weitere Kalkulationen bezüglich des Einflusses von Reproduktionsrate und Milchleistung durchgeführt. Zu den Kalkulationen wurde eine Spanne von 10 % (extrem niedrig) bis 50 % (extrem hoch) Reproduktionsraten herangezogen. Die Daten setzen sich aus dem kumulierten Energieaufwand für die Fütterung der Milchkuh und dem kumulierten Energieaufwand für die Fütterung während des Aufzuchtzeitraumes des Jungtieres zusammen. 25 Monate werden als Aufzuchtdauer pro Färse in SPIEKERS & POTTHAST (2004) empfohlen und in den Berechnungen zugrunde gelegt. Je höher die Reproduktionsrate ist, desto höher ist der Anteil der Aufzuchtmonate, die in den Kalkulationen zu berücksichtigen sind (Tabelle 4).

Tabelle 4: Berechnete Aufzuchtmonate pro Kuh und Jahr in Abhängigkeit von der Reproduktionsrate

Reproduktionsrate %	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Aufzuchtmonate	2,5	3,8	5,0	6,3	7,5	8,8	10,0	11,3	12,5

$$\frac{\text{Aufzuchtdauer}_{\text{gesamt}} [\text{Monate}] \cdot \text{RR}^*}{100} = \text{Aufzuchtdauer pro Kuh und Jahr} [\text{Monate}] \quad (17)$$

\* RR = Reproduktionsrate

### 3.6 Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse

Aufgrund der kumulativen Wirkungen der Inputunsicherheiten und der Schwankungsbreite von Daten werden Unsicherheiten in die Ergebnisse von Sachbilanzen eingeführt (ISO 14041, 1998). Daher wird zur Bewertung der Energiebilanzierung eine Einschätzung der Datenqualität durch Sensitivitätsanalysen bedeutender Energieinputs durchgeführt, um Unsicherheiten der Ergebnisse beurteilen zu können. Bei der Sensitivitätsanalyse wird durch gezielte Parametervariation die Ergebnisempfindlichkeit ermittelt (SCHWARZ, 2001). Sie dient als Analyseform für komplexe Systeme und Probleme. Dabei werden einfache Wirkungsbeziehungen zwischen Systemvariablen zu einem Wirkungsnetz verbunden.

Zur Bewertung der Energiebilanzierung wird eine Fehlerfolgeabschätzung durchgeführt. Zur Fehlerfolgeabschätzung wird das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz genutzt. Diese Art der Unsicherheitsanalyse von Ergebnissen ermöglicht die Einbeziehung verschiedener Betrachtungsgrößen, welche bekannte oder gemessene Ungenauigkeiten beinhalten (HUGGINS, 1991).  $R$  sei eine funktionelle Beziehung zwischen  $n$ -unabhängigen Variablen und man möchte die Unsicherheit eines Ergebnisses berechnen. Das Ergebnis einer Funktion  $R = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , die von  $n$ -unabhängigen Variablen abhängt, wird aus den jeweiligen Mittelwerten ( $\bar{x}_i$ ) berechnet. Jede Variable hat dabei die individuelle Unsicherheit  $u_i$ .

$$R = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (18)$$

und

$$x_i = \bar{x}_i \pm u_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

$u_i$  = Unsicherheit von  $x_i$

Quantitative Werte für  $u_i$  der Gleichung (19) können von einer instrumentellen Messung spezifiziert werden oder idealerweise aus einer statistischen Auswertung von Daten entnommen werden. In anderen Fällen können Beziehungen wie in Gleichung (19) als gültig bezeichnet werden, wenn eine Wahrscheinlichkeit, beispielsweise die Höhe des Vertrauens im Unsicherheitsbereich  $u_i$  gegeben ist.

Zur Berechnung der Unsicherheit von  $R$  geht man von der linearen Näherung mehrerer unabhängiger Variablen aus. Die quadrierten Beträge der Einzelunsicherheiten müssen addiert werden. Die Unsicherheit der Funktion  $R$  ergibt sich somit aus dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz aus folgender Formel:

$$u_R = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta R}{\delta x_1} \cdot u_1\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{\delta x_2} \cdot u_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta R}{\delta x_n} \cdot u_n\right)^2} \quad (20)$$

Wie in Kapitel 3.2 (Gleichung (7)) definiert wurde, ergibt sich der kumulierte Energieaufwand zu:

$$E = E_F(R) + E_N(RP) + E_P + E_{MtA} + E_G$$

$E_F(R)$  Energieaufwand für den Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung

$E_N(RP)$  Energieaufwand für den Verfahrensabschnitt Nachzucht

$E_P$  Energieaufwand für den Verfahrensabschnitt Produktgewinnung

$E_{MtA}$  Energieaufwand für den Verfahrensabschnitt Maschinen und technische Ausrüstung

$E_G$  Energieaufwand für den Verfahrensabschnitt Gebäude und bauliche Anlagen

Die Unsicherheit des kumulierten Energieaufwands für den Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$E_F(R) = \bar{X} \cdot \bar{Z} \quad (21)$$

$E_F(R)$  = Energieeinsatz Futterbereitstellung in Abhängigkeit der Ration

$\bar{X}$  = mittlerer Energieaufwand zur Herstellung eines Kilogramms Futtermittel

$\bar{Z}$  = mittlere Futtermenge in kg pro Kuh und Jahr

$$u_{E_F(R)} = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta E_F(R)}{\delta \bar{X}} \cdot u_x\right)^2 + \left(\frac{\delta E_F(R)}{\delta \bar{Z}} \cdot u_z\right)^2} \quad (22)$$

$$u_{E_F(R)} = \pm \sqrt{\left(\bar{Z} \cdot u_x\right)^2 + \left(\bar{X} \cdot u_z\right)^2} \quad (23)$$

Für den Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung im Bereich Nachzucht errechnet sich die Unsicherheit des kumulierten Energieaufwands nach folgender Gleichung:

$$E_N(F) = \bar{A} \cdot \bar{B} \quad (24)$$

$E_N(F)$  = Energieeinsatz Futterbereitstellung in Abhängigkeit der Ration

$\bar{A}$  = mittlerer Energieaufwand zur Herstellung eines Kilogramms Futtermittel

$\bar{B}$  = mittlere Futtermenge in kg pro Färse und Aufzuchtdauer

$$u_{E_N(F)} = \pm \sqrt{\left( \frac{\delta E_{N(F)}}{\delta \bar{A}} \cdot u_A \right)^2 + \left( \frac{\delta E_{N(F)}}{\delta \bar{B}} \cdot u_B \right)^2} \quad (25)$$

$$u_{E_N(F)} = \pm \sqrt{\left( \bar{B} \cdot u_A \right)^2 + \left( \bar{A} \cdot u_B \right)^2} \quad (26)$$

Für den Verfahrensabschnitt Milchgewinnung wird die Unsicherheit des kumulierten Energieaufwands wie folgt berechnet:

$$E_P = \bar{H} \cdot \bar{Y} \cdot \bar{V} \quad (27)$$

$E_P$  = Energieeinsatz Produktgewinnung

$\bar{V}$  = mittlere Milchleistung in kg pro Kuh und Jahr

$\bar{Y}$  = mittlerer Elektroenergieaufwand pro kg Milch

$\bar{H}$  = mittlerer Energieaufwand zur Bereitstellung der Elektroenergie

$$u_{E_P} = \pm \sqrt{\left( \frac{\delta E_P}{\delta \bar{H}} \cdot u_H \right)^2 + \left( \frac{\delta E_P}{\delta \bar{Y}} \cdot u_Y \right)^2 + \left( \frac{\delta E_P}{\delta \bar{V}} \cdot u_V \right)^2} \quad (28)$$

$$u_{E_P} = \pm \sqrt{\left( \bar{Y} \cdot \bar{V} \cdot u_H \right)^2 + \left( \bar{H} \cdot \bar{V} \cdot u_Y \right)^2 + \left( \bar{H} \cdot \bar{Y} \cdot u_V \right)^2} \quad (29)$$

Die Unsicherheit des kumulierten Energieaufwands für das Verfahren Milchviehhaltung wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$u_E = \pm \sqrt{\left( \frac{\delta E}{\delta E_F(R)} \cdot u_{E_F(R)} \right)^2 + \left( \frac{\delta E}{\delta E_N(RP)} \cdot u_{E_N(RP)} \right)^2 + \left( \frac{\delta E}{\delta E_P} \cdot u_{E_P} \right)^2} \quad (30)$$

Der kumulierte Energieaufwand  $E$  berechnet sich somit aus der Summe der Mittelwerte  $\bar{E}$  und der Unsicherheit  $u_E$  der einzelnen Verfahrensabschnitte (Gleichung (31)).

$$E = \bar{E} \pm u_E \quad (31)$$

Weiterhin werden zufällige Fehler betrachtet, wobei jeweils ein Parameter oder gegebenenfalls mehrere Parameter verändert werden.

Die Sensitivitätsanalyse erfolgt durch die Verwendung von variierten einzelnen Inputfaktoren. Daraufhin erfolgt der Vergleich der Ergebnisse mit den Ergebnissen der Standardinputs.

### 3.7 Energieintensität in Abhängigkeit von Verfahrensvarianten

Der Energieaufwand im Produktionsverfahren ist auf vielfältige Weise beeinflussbar. Im Abschnitt 4.1 werden die Ergebnisse zum kumulierten Energieaufwand für das Standardverfahren vorgestellt und diskutiert. Diese Kalkulationen bilden die Grundlage für die folgenden Berechnungen zur Verfahrensoptimierung. Die Berechnungen beziehen sich auf die gleichen Verfahrensabschnitte und Systemgrenzen, die in Abschnitt 3.2 vorgestellt werden.

Es werden zwei Extremvarianten der Energieintensität zur Milchproduktion betrachtet, welche den Einfluss der Managemententscheidungen hervorheben. Eine Extremvariante wird vorgestellt, die auf Parameter zugreift, die die Energieintensität reduzieren. Die zweite Extremvariante ist beispielhaft für Maßnahmen, die zur Erhöhung der Energieintensität führen.

### 3.8 Beschreibung der angewendeten Methoden zur Allokation des kumulierten Energieaufwands in der Milchviehhaltung

Nachdem der kumulierte Energieaufwand im Standardverfahren der Milchproduktion (siehe Abschnitt 4.1) ermittelt wurde, stellt sich die Frage der Allokation der Energieinputs auf die entstehenden Energieoutputs. Das Milchproduktionsverfahren ist ein Verfahren mit Kuppelproduktion. Das heißt neben dem Zielprodukt Milch werden zwangsläufig weitere Produkte hergestellt. Als Kuppelprodukte werden im Milchproduktionsverfahren Fleisch in Form der Schlachtkuh, das zur Milchbildung notwendige Kalb, als auch Exkreme gebildet. Das Kalb kann sowohl zur Bestandsergänzung als auch zur Mast genutzt werden. In den durchgeführten Untersuchungen werden diesbezüglich keine Unterschiede für die energetische Bewertung vorgenommen. Als weitere Energieoutputs des Verfahrens werden die Bildung von Fortwärme als auch die Freisetzung von Methan betrachtet. Die Fortwärme enthält alle an die Umgebung freigesetzten Wärmemengen, die mit dem Energieumsatz des Tieres verbunden sind. Sie wird an die Umwelt abgegeben und wird somit Bestandteil der Umweltenergie, welche als Fortwärme nicht mehr identifiziert werden kann. Als energietragendes Gas wird das freigesetzte Methan im Milchproduktionsverfahren betrachtet. Methan wird sowohl direkt vom Tier aus der Verdauung als auch aus den Exkrementen freigesetzt. Beide Freisetzungen des Methans werden in den Berechnungen berücksichtigt.

Im Folgenden werden verschiedene methodische Ansätze zur Allokation, also zur Zuordnung der Energieinput- und Energieoutputflüsse, des Verfahrens Milchproduktion vorgestellt. Übersicht 8 gibt einen kurzen Überblick der einzelnen Methoden.

Übersicht 8: Methodik der Allokation des kumulierten Energieaufwands

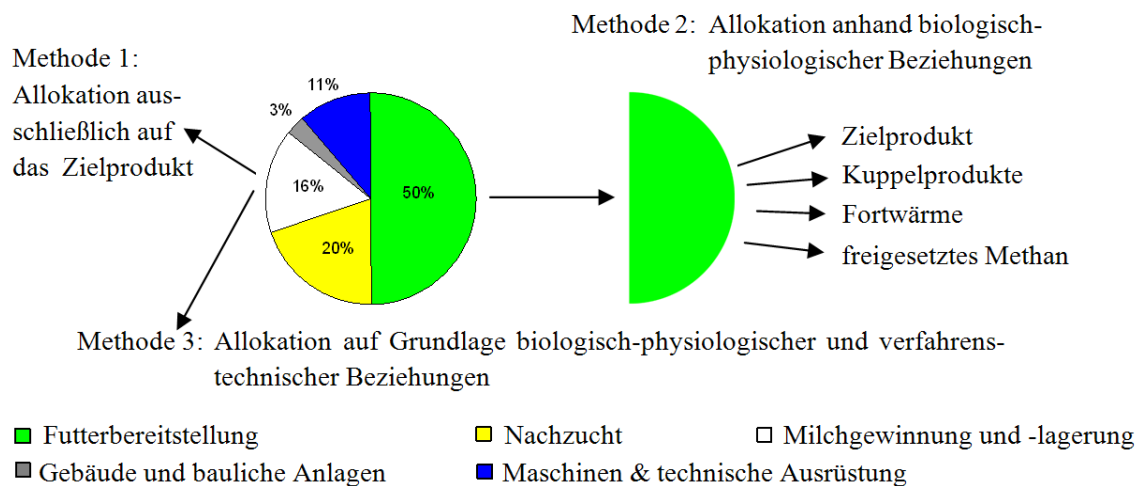


Tabelle 5 zeigt eine Aufschlüsselung der zur Allokation betrachteten Varianten der Methode 3 auf.

Tabelle 5: Varianten der Methode 3

Variante 0	Variante 1	Variante 2 Produkte	Variante 3 Energieoutputs	Variante 4 ökonomisch
M E	M S K	M S K E	M S K E F Me	M S K E + B
M = Milch E = Exkremente Me = Methan aus Verdauung S = Schlachtkuh F = Fortwärme K = Kalb B = Biogas				

### 3.8.1 1. Methode: Allokation ausschließlich auf das Zielprodukt

Die Allokation des kumulierten Energieaufwandes des Standardverfahrens Milchproduktion auf die unterschiedlichen Produkte wird vermieden. Der kumulierte Energieaufwand wird hierbei dem Zielprodukt Milch komplett zugeordnet. Diese methodische Vorgehensweise wird auch in anderen Bereichen häufig angewandt. Ein grundlegendes Argument dafür ist, dass das Produktionsverfahren nur stattfindet, weil das Zielprodukt hergestellt werden soll. Allerdings hat diese Methode auch den Nachteil, dass die im Zuge der Herstellung des Zielproduktes entstehenden Kuppelprodukte ohne Berücksichtigung bleiben. Das bedeutet, die Herstellung der Kuppelprodukte erfolgt ohne einen eigenen energetischen Aufwand.

### 3.8.2 2. Methode: Allokation anhand biologisch-physiologischer Beziehungen

*1. Schritt: Allokation des Energieaufwandes des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung anhand der Futterenergieverhältnisse aus der Tierernährung auf das Zielprodukt, die Kuppelprodukte, die Fortwärme und das Methan aus der Verdauung*

Diese methodische Vorgehensweise bezieht sich ausschließlich auf die Energieflüsse des Verfahrensabschnittes Futterbereitstellung, da hierbei eine biologisch-physiologische Beziehung zwischen den Energieinputs und den Energieoutputs vorhanden ist. Die Allokation der Energie dieses Verfahrensabschnittes ist von besonderer Bedeutung, da deren Energieflüsse im direkten Zusammenhang mit den Energieoutputs des Milchproduktionsverfahrens stehen. Die Allokation des kumulierten Energieaufwandes des Ver-



fahrensabschnittes Futterbereitstellung erfolgt anhand einer Prozessanalyse in Form einer Sachbilanz im Sinne der DIN EN ISO 14040/ 14041.

Dazu wird die vom Tier aufgenommene Futterenergie betrachtet. Die Futterenergie wird in einem schrittweisen Vorgang im Körper des Tieres für Leistung und Erhaltungsbedarf umgesetzt. Während dieses Vorgangs treten an mehreren Stellen energetische Umsetzungen auf, die dann dem Produktionssystem für unterschiedliche Prozesse zur Verfügung stehen. Für den Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung wird der Futterenergieeinsatz in den Berechnungen herangezogen, um dann systematisch die Anteile der Nahrungsenergie, die für die bestimmten Leistungen des Tieres notwendig sind, klar darzustellen. Dieser Lösungsansatz wird unter Nutzung des in Deutschland für Wiederkäuer speziell in der Milchviehfütterung typischen Futterbewertungssystems Nettoenergie-Laktation (NEL) betrachtet. Abbildung 8 zeigt das Schema des Energieumsatzes von der Bruttoenergie zur Nettoenergie.

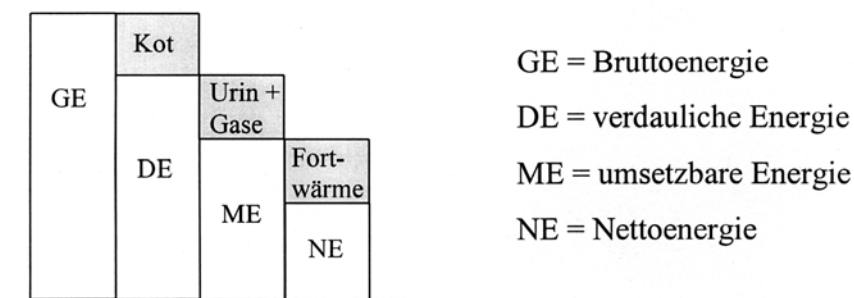


Abbildung 8: Ernährungsphysiologische Umwandlung der Energie

Ein Rückschluss auf den kumulierten Energieaufwand zur Herstellung der einzelnen Futtermittel wird anhand der Aufteilung des Futterenergiebedarfs gezogen. Entsprechend den Abschnitten der energetischen Umsetzungen der Futterenergie werden für die einzelnen Produkte adäquat Anteile zum Energieaufwand zur Futtermittelherstellung gebildet.

## 2. Schritt: Allokation des Energieaufwandes der Nettoenergie des Futters anhand des Nährstoffbedarfs zur Herstellung der Produkte Milch, Schlachtkuh und Kalb

Die Abgrenzung des Energieeinsatzes zwischen Bruttoenergie, verdaulicher Energie, umsetzbarer Energie und der Nettoenergie wurde bereits vorgenommen. Die Allokation der Nettoenergie wird auf das Zielprodukt Milch und auf die beiden Kuppelprodukte Schlachtkuh und Kalb vorgenommen.

Basis für die Kalkulationen sind der Futterenergiebedarf von 3,3 MJ pro kg Milch und der energetische Erhaltungsbedarf der Kuh von 37,7 MJ pro Tag (650 kg Lebendmasse). Dem Kalb wird ein zusätzlicher Futterenergiebedarf von durchschnittlich 8 kg Milch pro trockenstehende Kuh und Tag angerechnet.

Die Ermittlung des kumulierten Energieaufwands der einzelnen Produkte erfolgt entsprechend dem Anteil am Futterenergiebedarf.

### *3. Schritt: Ermittlung des Energieaufwands für die Exkremente*

Der kumulierte Energieaufwand für die Bereitstellung von Wirtschaftsdünger wird entsprechend dem Verhältnis der Aufteilung der Futterenergie ermittelt, welches sich aus der energetischen Umsetzung von der Bruttoenergie über die umsetzbare Energie bis hin zur verdaulichen Energie ergibt.

Die Höhe der Futteraufnahme hat einen entscheidenden Einfluss auf die tägliche CH<sub>4</sub>-Emission der Wiederkäuer. In Anlehnung an die Berechnungen von MILLS ET AL. (2001) wird für die Kalkulationen ein Anteil von 6 % der Bruttoenergie für die Methanbildung im Tier angesetzt.

Zur Ermittlung eines adäquaten Energiegehaltes für die Exkremente, in diesem Fall der Gülle, werden deren Nährstoffgehalte bezogen auf Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) berücksichtigt. Hierzu werden Durchschnittswerte aus der Literatur zur Berechnung herangezogen.

Wirtschaftsdünger enthalten Stickstoff sowohl in gelöster (Ammonium-N) als auch in organisch gebundener Form. Bei den Ammonium-N-Anteilen ist eine schnelle Pflanzenverfügbarkeit gegeben, wohingegen der Stickstoff in organischen Verbindungen über temperaturabhängige Mineralisierungsprozesse langsam freigesetzt wird. Die durchgeführten Kalkulationen beziehen den Gesamtstickstoff der Gülle ein, da er nach und nach für die Pflanzen verfügbar ist.

Da der Nährstoffgehalt der Gülle in Abhängigkeit der Rationsgestaltung stark schwanken kann, sind Beispiele für Extremnährstoffgehalte aus praktischen Analysen dargestellt. Es wird auf eine Nährstoffuntersuchung von 600 Rindergüllen (QUELLE 5) Bezug genommen, anhand derer extreme Schwankungen des Nährstoffgehaltes zu erkennen sind.

Die Nutzungsmöglichkeiten der Gülle werden in die Kalkulationen einbezogen. Dazu wird für die Gülle eine energetische Bewertung für den Einsatz als Düngemittel, zur Biogasproduktion sowie aus einer Kombination von beidem vorgenommen. Der zuvor

ermittelte energetische Gesamtwert für die Herstellung der Exkreme, in diesem Fall Gülle, wird in Abhängigkeit der Menge der enthaltenen Inhaltsstoffe aufgegliedert.

Der energetische Wert der Gülle bei der Biogasproduktion wird unter der Annahme ermittelt, dass pro  $\text{m}^3$  Gülle  $27 \text{ m}^3$  Biogas entstehen. Es wird eine Biogasausbeute von  $21,6 \text{ MJ pro m}^3$  unterstellt (FNR, 2007).

### 3.8.3 3. Methode: Allokation auf Grundlage biologisch-physiologischer und verfahrenstechnischer Beziehungen

---

Diese Vorgehensweise berücksichtigt den kumulierten Energieaufwand des gesamten Standardverfahrens Milchproduktion. Dementsprechend sind die Energieinputs aus den Teilbereichen Futterbereitstellung, Nachzucht, Milchgewinnung, Gebäude und bauliche Anlagen sowie Maschinen und technische Ausrüstung enthalten. Die Allokation des kumulierten Energieaufwands aller Verfahrensbereiche wird auf der Grundlage unterschiedlicher Beziehungen der Produkte zueinander vorgenommen.

In jeder berechneten Variante wird dem Zielprodukt Milch der energetische Aufwand aus dem Verfahrensabschnitt Milchgewinnung angelastet. Dieser Bereich dient ausschließlich dem Zielprodukt Milch.

Der Energieaufwand des Verfahrensabschnittes Futterbereitstellung findet nach den vorgestellten methodischen Vorgehensweisen im Abschnitt 3.8.2 bei den einzelnen Produkten Berücksichtigung.

*Variante 0* ordnet den kumulierten Energieaufwand auf die beiden Produkte Milch und Exkreme zu. Dabei wird für die Exkreme das Energieäquivalent für Mineraldünger in die Kalkulationen einbezogen.

Die *Variante 1* der Allokation bezieht sich ausschließlich auf die drei Produkte Milch, Schlachtkuh und Kalb. Damit wird die gesonderte energetische Zuordnung für die Exkreme, Fortwärme sowie das Methan aus der Verdauung vernachlässigt. Stattdessen wird deren energetischer Aufwand den drei genannten Produkten prozentual entsprechend des Anteils am kumulierten Energieaufwand für die Futterbereitstellung angerechnet.

Die Allokation des kumulierten Energieaufwandes unter *Variante 2* bezieht sich auf das Zielprodukt Milch und die 3 Kuppelprodukte des Milchproduktionsverfahrens.

In *Variante 2.1* wird unterstellt, dass lediglich die Fortwärme und das Methan aus der Verdauung aus dem Produktionskreislauf komplett verloren gehen und daher deren

energetischer Anteil an den Energieinputs auf das Zielprodukt Milch und die drei Kuppelprodukte Schlachtkuh, Kalb und Exkremente aufzuteilen ist. Diese Aufteilung erfolgt zu gleichen Anteilen, da Fortwärme als auch das freigesetzte Methan aus der Verdauung mit der Entstehung der Produkte gekoppelt sind.

In *Variante 2.2* werden die Produkte einschließlich Fortwärme und Methan aus der Verdauung nicht gleichwertig mit dem Energieaufwand belastet. Sowohl der Energieaufwand für die Milchgewinnung, die Gebäude und baulichen Anlagen, die Maschinen und die technische Ausrüstung als auch der Nachzucht wird hier beispielhaft der Milch mit dem Argument angelastet, dass das gesamte Haltungsverfahren der Milchproduktion dient und die anderen entstehenden Produkte daher nicht mit dem Energieaufwand für die Haltung belastet werden sollten. Das trifft ebenso auf den Energieaufwand für die Nachzucht zu, da das Tier mit dem Ziel der Milchproduktion gezüchtet wurde.

Der Milch als Zielprodukt wird auch der Energieaufwand aus der Futterbereitstellung für Fortwärme und Methan aus der Verdauung angelastet.

Mit *Variante 2.3* wird berücksichtigt, dass sowohl für die Erzielung der Produkte Milch, Kalb und Exkremente immer die Kuh notwendig ist und daher auch der Energieaufwand für die Gewährleistung des Erhaltungsbedarfes, der bisher immer komplett der Schlachtkuh zugerechnet wurde, auf alle vier Produkte aufgeteilt werden muss.

In *Variante 2.4* wird für die Kalkulation des Energieaufwands für die Exkremente das Energieäquivalent für Mineraldünger verwendet. Wie in Methode 2 beschrieben, wird der Energieaufwand der Futterbereitstellung auf die vier Produkte allokiert. Der Energieaufwand des Verfahrensabschnitts Milchgewinnung wird komplett dem Zielprodukt Milch zugeordnet. Die Allokation des Energieaufwands der Verfahrensabschnitte Nachzucht, Gebäude und bauliche Anlagen sowie Maschinen und technische Ausrüstung erfolgt gleichberechtigt zwischen den Produkten Milch, Schlachtkuh und Kalb.

In *Variante 2.5* erfolgt die Allokation des kumulierten Energieaufwandes des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung nach Methode 2 auf die vier Produkte Milch, Schlachtkuh, Kalb und Exkremente. Die Zuordnung des kumulierten Energieaufwandes der Futterbereitstellung für die Fortwärme sowie das aus der Verdauung freigesetzte Methan des kumulierten Energieaufwandes für den Verfahrensabschnitt Nachzucht und für die Maschinen, die zur Fütterung eingesetzt werden, erfolgt nach gleichem Aufteilungsschlüssel wie in Methode 2 auf die drei Produkte Milch, Schlachtkuh und Kalb. Der Energieaufwand für die Verfahrensabschnitte Milchgewinnung, für die Gebäude sowie für die technische Ausrüstung und die Maschinen zur Entmistung wird komplett der

Milch zugerechnet, da das Haltungssystem für die Milchgewinnung notwendig ist, jedoch nicht für die Produktion von Fleisch oder Kalb.

Als dritte Möglichkeit der Allokation werden bei den *Varianten 3* alle Energieoutputs des Milchproduktionsverfahrens berücksichtigt.

Die *Variante 3.1* bezieht sich auf die Aussage, dass der Energieaufwand gleichberechtigt auf alle entstehenden Produkte einschließlich Fortwärme und Methan aus der Verdauung zugeordnet wird, da alle als Teil in dem definierten Standardverfahren der Milchproduktion entstanden sind.

In *Variante 3.2* wird der kumulierte Energieaufwand im Verhältnis der ernährungsphysiologischen Anteile auf die verschiedenen Energieoutputs des Verfahrens aufgeteilt.

Die *Varianten 4* betrachten die Allokation des kumulierten Energieaufwands aus ökonomischer Sicht.

In *Variante 4.1* erfolgt die Aufteilung des kumulierten Energieaufwandes auf die Produkte sowie Fortwärme und Methan aus der Verdauung für die Bereiche Nachzucht, Gebäude und bauliche Anlagen sowie Maschinen und technische Ausrüstung im gleichen Verhältnis wie bei der Allokation des kumulierten Energieaufwands für die Futterbereitstellung.

*Variante 4.2* beschreibt die Allokation des kumulierten Energieaufwands auf die Kuppelprodukte in Abhängigkeit ihres ökonomischen Wertes.

Für jeden ermittelten Energieaufwand der Varianten 0 bis 4 wird die Energieintensität dargestellt.

### 3.9 Energieeffizienz des Standardverfahrens

Zur Bewertung der Energieeffizienz des Produktionsverfahrens wird das Energieoutput/Energieinput-Verhältnis (OI) gebildet.

$$\text{Energieoutput / Energieinput – Verhältnis (OI)} = \frac{\text{Energieoutput (EO)}}{\text{Energieinput (EI)}} \quad (32)$$

Dazu werden alle im Verfahren produzierten und weiterhin nutzbaren Energieoutputs, dazu zählen Milch, Schlachtkuh, Kalb und Exkrement, ins Verhältnis zu den Energieinputs gestellt.

Energetische Prozesse sind mit der Umwandlung von Energie in unterschiedliche Energieformen verbunden. Im Allgemeinen gilt, dass der Wirkungsgrad bzw. die Energieeffizienz nicht höher als Eins sein kann, da die Energie umgewandelt, jedoch nicht vermehrt wird. Tatsächlich ist der Wirkungsgrad bzw. die Energieeffizienz energetischer

Umwandlungsprozesse im Normalfall geringer als Eins, da ein Teil der Energie den Produktionskreislauf, häufig in Form von Wärme, verlässt.

In der speziellen Ermittlung der Energieeffizienz in der Tierhaltung wird die Energieeffizienz anhand von Energien ermittelt, die sich auf unterschiedliche Art zusammensetzen. Einerseits wird der Energiegehalt der Energieoutputs ermittelt. Dabei wird für die drei Kuppelprodukte Milch, Schlachtkuh und Kalb der energetische Nährwert als Lebensmittel für die menschliche Ernährung in die Berechnung einbezogen (Tabelle 41, S. 111). Für das Kuppelprodukt Exkremente erfolgt die energetische Bewertung entsprechend den enthaltenen Düngestoffen Stickstoff, Phosphor und Kalium (Tabelle 31, S. 102). Der Energieinput entspricht dem kumulierten Energieaufwand des Standardverfahrens (Tabelle A12, S. 188). Da für den Energieinput keine metabolische Energie und keine Sonnenenergie in die Berechnungen einfließen, kann es in diesem speziellen Fall zu einer Energieeffizienz höher Eins kommen.

### **3.10 Energiebilanzierung für die Untersuchungsbetriebe**

Zwei Praxisbetriebe werden hinsichtlich ihres kumulierten Energieaufwands in der Milchproduktion untersucht. Die Kalkulationen für die Praxisbetriebe sind erforderlich, um für das entwickelte theoretische Standardverfahren Vergleichsdaten zu erhalten. Für beide Betriebe wird der kumulierte Energieaufwand entsprechend den definierten Verfahrensabschnitten des Standardverfahrens ermittelt. Um mögliche Unterschiede des kumulierten Energieaufwands bezüglich verschiedener Betriebsgrößen und Formen erkennen zu können, werden Betriebe gewählt, welche sich diesbezüglich unterscheiden. Beide Untersuchungsbetriebe werden entsprechend der bisher genutzten Untersuchungsregion ebenfalls im Nordosten Deutschlands betrachtet. Untersuchungsbetrieb 1 ist dabei ein klassischer Familienbetrieb und Untersuchungsbetrieb 2 eine Agrargenossenschaft. Die Kalkulationen zum Energieaufwand des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung erfolgten mit dem Kalkulationsprogramm REPRO. In den Betrieben wurden die dazu benötigten Daten bezüglich Standortbedingungen, Fruchtarten, Düngung, Pflanzenschutzmitteleinsatz, Erträge als auch zu den Anbauverfahren mit Hilfe von Interviews erhoben. Weitere Daten bezüglich des Tierproduktionsverfahrens, dem Tierbestand, der Milchgewinnung, der Haltung sowie der Fütterung und Entmistung wurden ebenfalls durch Befragungen ermittelt.

## **4 Ergebnisse**

### **4.1 Ermittlung der Energieintensität des Standardverfahrens**

#### **4.1.1 Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung**

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse der Ermittlung der Energieintensität für die Produktion von einzelnen Futtermitteln, die Hauptanteile in Futterrationen für Milchvieh sind. Die Kalkulation des kumulierten Energieaufwandes für die Futtermittel wurde, wie im Abschnitt 3.4 beschrieben, mit dem Bilanzierungsmodell REPRO durchgeführt (Tabelle A1).

Der kumulierte Energieaufwand wurde für Maissilage, Grassilage, Triticale, Weidefutter und Heu ermittelt. Die Ertragsklassen der einzelnen Futtermittel unterscheiden sich hinsichtlich des Energieaufwands. Beim Weidefutter besteht eine Differenz von 35 % zwischen dem Energieaufwand der Ertragsklassen 1 und 3. Die Ertragsklassen 1 und 4 des Heus unterscheiden sich hinsichtlich des Energieaufwands um 31 %. Der Energieaufwand zur Herstellung von Triticale in Ertragsklasse 4 ist um ein Viertel höher als in der Ertragsklasse 1. Bei der Produktion von Maissilage ist der Energieaufwand der Ertragsklassen 1 bis 3 annähernd gleich, bei Ertragsklasse 4 ist eine Abweichung nach oben zu verzeichnen.

Der Vergleich des Energieaufwandes der einzelnen Futtermittel miteinander in den gleichen Ertragsklassen zeigt, dass die Produktion von Grassilage, Heu und Triticale im Hinblick auf den produzierten Nährwert in MJ NEL am energieaufwändigsten ist. Die Herstellung von Grassilage benötigt einen bis zu 30 % höheren kumulierten Energieaufwand pro MJ NEL als die Produktion von Maissilage. Die Hauptgründe dafür sind die mehrfachen Schnitte und der niedrigere Ertrag der Grassilage. Die Weide hat einen wesentlich geringeren kumulierten Energieaufwand als die anderen Futtermittel. Da nur gedüngt wird und Pflegemaßnahmen durchgeführt werden, ist der Maschineneinsatz gering. Beim Heu ist der Energieaufwand der Ertragsklasse 3 um knapp 30 % höher als der für die Grassilage. In diesem Fall wurde der geringere Ertrag nicht durch die geringere Düngung kompensiert. Der kumulierte Energieaufwand der Futtermittel in Abhängigkeit der Ertragsklassen kann unter den genannten Bedingungen um bis zu 35 % variieren.

Tabelle 6: Energieintensität für unterschiedliche Futtermittel für verschiedene Ertragsklassen

Futtermittel	Ertrags- klasse	Mineral- dünger kg N ha <sup>-1</sup>	TME <sup>a</sup> dt ha <sup>-1</sup>	EI <sup>b</sup> MJ kg <sup>-1</sup> TM	Vergleich Futtermittel %	EI <sup>b</sup> MJ MJ <sup>-1</sup> NEL	Vergleich Futtermittel %	EI <sup>b</sup> MJ kg <sup>-1</sup> nXP	Vergleich Futtermittel %	Vergleich Ertrags- klassen %
Mais (Silomais)	1	144	120	1,68 <sup>a</sup>	71	0,262 <sup>d</sup>	67	0,013 <sup>d</sup>	75	101
Mais (Silomais)	2	132	110	1,66 <sup>a</sup>	84	0,259 <sup>d</sup>	80	0,013 <sup>d</sup>	88	100
Mais (Silomais)	3	114	95	1,69 <sup>a</sup>	92	0,264 <sup>d</sup>	88	0,013 <sup>d</sup>	97	102
Mais (Silomais)	4	90	75	1,83 <sup>a</sup>	95	0,287 <sup>d</sup>	91	0,014 <sup>d</sup>	101	110
Triticale	1	149	55	2,57	109	0,310	80	0,015	88	98
Triticale	2	135	50	2,64	133	0,318	97	0,016	107	100
Triticale	3	104	40	2,84	155	0,342	114	0,017	125	108
Triticale	4	80	30	3,28	170	0,395	125	0,019	137	124
Grassilage <sup>c</sup>	1 <sup>g</sup>	141	90	2,37 <sup>b</sup>	100	0,388 <sup>e</sup>	100	0,017 <sup>e</sup>	100	119
Grassilage <sup>c</sup>	2 <sup>h</sup>	65	70	1,99 <sup>b</sup>	100	0,326 <sup>e</sup>	100	0,015 <sup>e</sup>	100	100
Grassilage <sup>c</sup>	3 <sup>i</sup>	30	50	1,84 <sup>b</sup>	100	0,301 <sup>e</sup>	100	0,013 <sup>e</sup>	100	92
Grassilage, extensiv <sup>c</sup>	4 <sup>i</sup>	0	40	1,92 <sup>b</sup>	100	0,315 <sup>e</sup>	100	0,014 <sup>e</sup>	100	97
Weide, intensiv	1	140	80	0,95	40	0,148	38	0,007	38	113
Weide, intensiv	2	80	60	0,84	42	0,131	40	0,006	40	100
Weide, intensiv	3	20	40	0,65	36	0,102	34	0,005	34	78
Weide, intensiv	4	0	30	0,83	43	0,129	41	0,006	41	98
Heu	1 <sup>h</sup>	140	90	2,14 <sup>c</sup>	90	0,404 <sup>f</sup>	104	0,018 <sup>f</sup>	102	120
Heu	2 <sup>i</sup>	74	70	1,78 <sup>c</sup>	90	0,336 <sup>f</sup>	103	0,015 <sup>f</sup>	101	100
Heu	3 <sup>i</sup>	50	50	2,03 <sup>c</sup>	110	0,382 <sup>f</sup>	127	0,017 <sup>f</sup>	125	114
Heu, extensiv	4 <sup>i</sup>	0	40	1,58 <sup>c</sup>	82	0,299 <sup>f</sup>	95	0,013 <sup>f</sup>	93	89

<sup>a</sup> TME - Trockenmasseertrag Hauptprodukt

<sup>d</sup> 15 % Verluste (Quelle: REPRO)

<sup>g</sup> 4 Schnitte

<sup>b</sup> EI - Energieintensität

<sup>e</sup> 20 % Verluste (Quelle: REPRO)

<sup>h</sup> 3 Schnitte

<sup>c</sup> mit Feldhäcksler

<sup>f</sup> 30 % Verluste (Quelle: REPRO)

<sup>i</sup> 2 Schnitte



Der Vergleich des Energieaufwands der einzelnen Futtermittel ist entscheidender als der Vergleich des Energieaufwands der Ertragsklassen der Futtermittel, weil die Unterschiede des Energieaufwands zwischen den verschiedenen Futtermitteln höher sind als zwischen den Ertragsklassen.

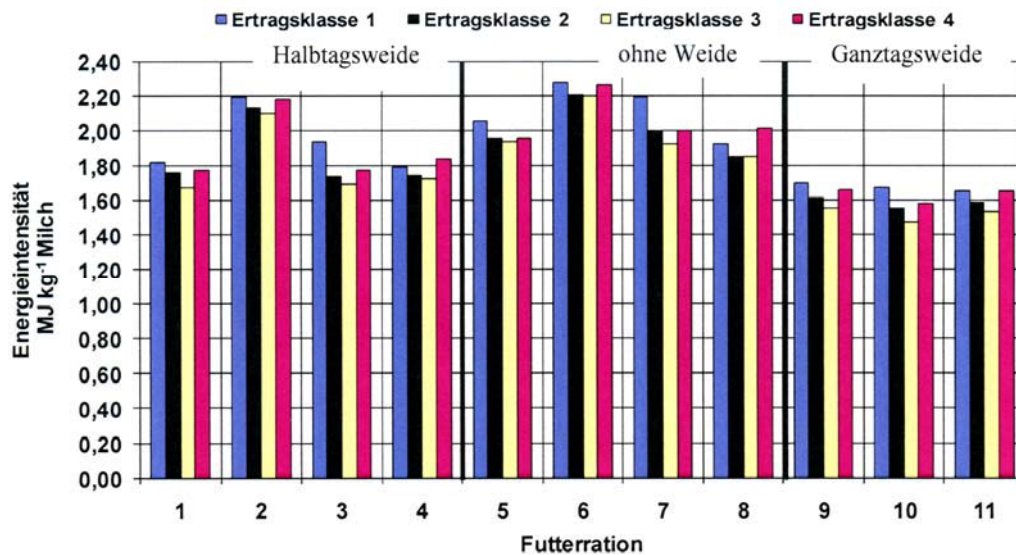
Für die unterschiedlichen Futtermittel werden die in Tabelle 7 aufgezeigten Kennwerte in die Berechnungen einbezogen.

Tabelle 7: Trockenmasse, Energie- und Nährstoffgehalte der Futtermittel (SPIEKERS & POTTHAST, 2004)

<b>Futtermittel</b>	<b>TM g kg<sup>-1</sup></b>	<b>NEL MJ kg<sup>-1</sup> TM</b>	<b>nXP g kg<sup>-1</sup> TM</b>
Grassilage	350	6,1	137
Weide	180	6,4	143
Maissilage	310	6,4	130
Heu	860	5,3	121
Triticale	880	8,3	170

Als Ausgangsration wird die "Standardration" (siehe Abschnitt 3.4) betrachtet, deren Rationsbestandteile in einem ausgeglichenen Verhältnis zueinander stehen. Die Berechnungen erfolgten, bezogen auf den Energieaufwand der eingesetzten Futtermittel, für die vorher beschriebenen Ertragsklassen. Es wurden weitere Futterrationen berechnet, in denen jeweils ein Rationsbestandteil (Maissilage, Grassilage oder Kraftfutter) maximiert ist. Dazu wurden drei verschiedene Fütterungsstrategien betrachtet: Fütterung mit Halbtagsweide im Sommer, Stallfütterung und Fütterung mit Ganztagsweide im Sommer.

Abbildung 9 zeigt die Energieintensität der verschiedenen Futterrationen unter Einsatz von Futtermitteln aus den vier Ertragsklassen, aber auch die Beziehung der verschiedenen Futterrationen zueinander. Es ist zu erkennen, dass die Unterschiede der Energieintensität zwischen den Ertragsklassen der einzelnen Futterrationen nur gering sind. Bei Ration 10 ist die größte Differenz zwischen den Ertragsklassen 1 bis 3 mit 12 % zu erkennen. Die Energieintensität der Ertragsklassen der 11 Rationen ist ähnlich. Das Optimum der Energieintensität liegt bei Ertragsklasse 2 und Ertragsklasse 3. Die Energieintensität der Ertragsklassen 1 und 4 ist annähernd gleich hoch. Eine Ausnahme bildet hierbei die Ertragsklasse 4 bei den Futterrationen 4 und 8. Da hier im Gegensatz zu den anderen Rationen, in denen bei Ertragsklasse 1 der höchste Energieaufwand zu verzeichnen ist, der höchste Energieaufwand bei Ertragsklasse 4 liegt.



Futtermitteln: Die Grundbedingungen der Futtermitteln sind gleich, aber der Anteil eines Rationsbestands teils ist jeweils maximiert.

- |   |  |
|---|--|
| 1 - Standardration                                | 7 - Grassilage ohne Weide (45 %)         |
| 2 - Ausgleichs- und Kraftfutter (50 %)            | 8 - Maissilage ohne Weide (45 %)         |
| 3 - Grassilage (40 %)                             | 9 - Standard mit Ganztagsweide           |
| 4 - Maissilage (35 %)                             | 10 - Grassilage mit Ganztagsweide (35 %) |
| 5 - Standard ohne Weide                           | 11 - Maissilage mit Ganztagsweide (25 %) |
| 6 - Ausgleichs- und Kraftfutter ohne Weide (55 %) |  |
- Rationen 1 - 4 Halbtagsweide im Sommer  
 Rationen 5 - 8 ohne Weide  
 Rationen 9 - 11 Ganztagsweide im Sommer

Abbildung 9: Vergleich der Energieintensität unterschiedlicher Futtermitteln und Ertragsklassen

Die Energieintensität der Variante "Ausgleichs- und Kraftfutter" mit Halbtagsweide (Ration 2) ist um 25 % höher als der der "Standardration". Der Grund für diese Differenz ist der hohe Anteil von Ausgleichs- und Kraftfuttermitteln, die einen hohen Energieaufwand haben. Die Werte des Energieaufwands zur Herstellung dieser Futtermittel basieren auf Angaben der Datenbank Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS). Danach beträgt die Energieintensität für Sojaextraktionsschrot 4,25 MJ kg<sup>-1</sup> TM und für Rapsextraktionsschrot 5,26 MJ kg<sup>-1</sup> TM. Verwendet man für Sojaextraktionsschrot eine Energieintensität von 2 MJ kg<sup>-1</sup> TM (KIM & DALE, 2004) und für Rapsextraktionsschrot 4 MJ kg<sup>-1</sup> TM (eigene Kalkulationen mit REPRO) sinkt zwar der kumulierte Energieaufwand der Rationen, aber der kumulierte Energieaufwand der Ration 2 bleibt dennoch um etwa 25 % höher als der der Standardration, da der Anteil der Kraftfuttermittel Rapsextraktionsschrot und Sojaextraktionsschrot im Verhältnis zum unveränderten Anteil des Milchleistungsfutters in der Ration nur gering ist. Der Vergleich zwischen den Varianten "Grassilage" mit Halbtagsweide (Ration 3), "Maissilage"

mit Halbtagsweide (Ration 4) und der "Standardration" zeigt, dass mit einem maximierten Anteil an Gras- oder Maissilage die Energieintensität ungefähr gleich bleibt. Ursache dafür ist der etwas höhere Einsatz an Ausgleichs- und Kraftfutter in der Ration 4 gegenüber Ration 3.

Weitere Untersuchungen befassen sich mit der Fütterungsstrategie. Es wird geprüft, welchen Einfluss der Anteil der Weidefütterung auf die Energieintensität der Futterrationen ausübt. In Abbildung 9 sind vier Futterrationen für reine Stallfütterung, das heißt ohne Weidefutter, dargestellt. Die Energieintensität dieser Rationen ist um 4 bis 13 % höher als die Energieintensität der Rationen mit Halbtagsweide. Die Energieintensität der Variante "Ausgleichs- und Kraftfutter ohne Weide" (Ration 6) ist am höchsten im Vergleich zu allen anderen Varianten.

In Abbildung 9 sind außerdem drei Rationsvarianten mit Ganztagsweide im Sommer abgebildet. Die Energieintensität dieser Rationen ist geringer als der der anderen Varianten mit Halbtagsweide und Stallfütterung.

#### 4.1.1.1 Energieintensität des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung

Der Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung geht entsprechend der Standardration (1) mit 14.102 MJ pro Kuh und Jahr in die Berechnungen zum kumulierten Energieaufwand des Standardverfahrens ein. Daraus resultiert eine Energieintensität von 1,76 MJ kg<sup>-1</sup> Milch. Die Aufteilung des kumulierten Energieaufwands des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung ist in Abbildung 10 dargestellt. Für die Produktion der Zukauffuttermittel werden demnach 43 % der eingesetzten Energie benötigt und der restliche Anteil von 57 % für die Herstellung wirtschaftseigener Futtermittel.

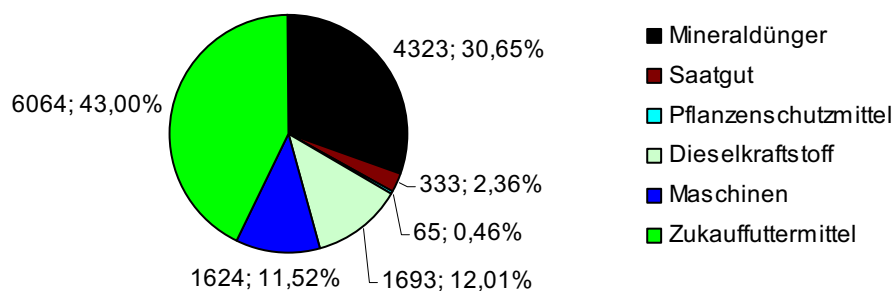


Abbildung 10: Kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung [MJ]

#### 4.1.1.2 Kumulierter Energieaufwand in Abhängigkeit unterschiedlicher Schnitthäufigkeit von Grünland zur Grassilageproduktion

Weitere Untersuchungen zum Energieaufwand der Futterbereitstellung beziehen sich auf den Energieaufwand der Bewirtschaftungsintensität bei der Ernte von Grassilage (Abbildung 11). Für diese Kalkulationen sind die gleichen Erträge und gleiche Bewirtschaftungsmaßnahmen angenommen wie für Ertragsklasse 2 (Tabelle 6). Die Energieintensität für die Aufteilung der Grassilage bezogen auf das kg Trockenmasse und ebenso bezogen auf MJ NEL ist bei der Nutzungsvariante mit vier Schnitten um 20 % höher und bei der Nutzungsvariante mit zwei Schnitten um 20 % niedriger als bei der Variante mit drei Schnitten. Grund dafür ist der ansteigende beziehungsweise abnehmende Einsatz von Maschinen und demzufolge auch von Dieselmotorkraftstoff.

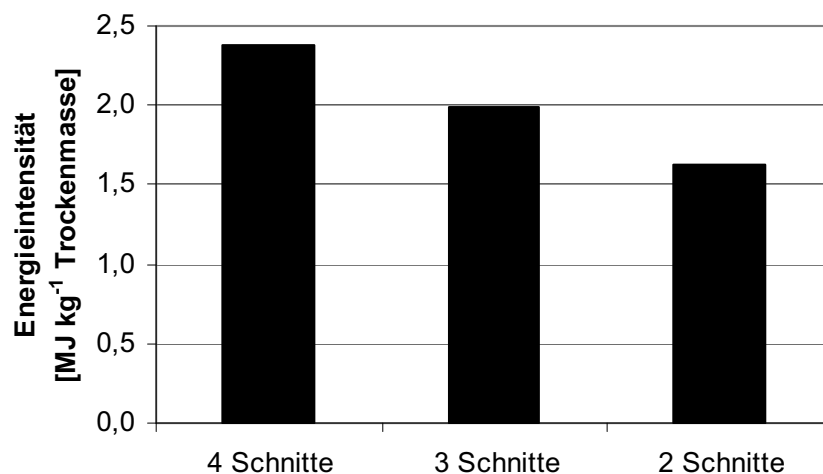


Abbildung 11: Energieintensität für die Futterbereitstellung von Grassilage in Abhängigkeit unterschiedlicher Ernteintensitäten mit einem Feldhäcksler

Die detaillierte Ermittlung des kumulierten Energieaufwands für die Erträge der einzelnen Schnitte wurde nach folgender Einteilung der Erntemenge auf die Schnitte vorgenommen (Tabelle 8):

Tabelle 8: Schnittertragsverteilung (LVLF, 2005)

Schnitt-häufigkeit	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 4
4	0,35	0,25	0,2	0,2
3	0,45	0,30	0,25	
2	0,60	0,40		

Verschiedene Studien haben bereits gezeigt, dass die Erträge pro Schnitt mit ansteigender Schnitthäufigkeit geringer werden (KÄDING, 2006; REID, 1986). Die durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss der Schnitthäufigkeit auf die Energieintensität zeigen deutlich, dass mit zunehmender Schnitthäufigkeit aufgrund sinkender Erträge pro Schnitt der kumulierte Energieaufwand pro kg Erntegut ansteigt (Abbildung 12). Der Energieaufwand pro kg Trockenmasse in Abhängigkeit der Schnitthäufigkeit variiert mit einer Spannweite von bis zu etwa 60 %.

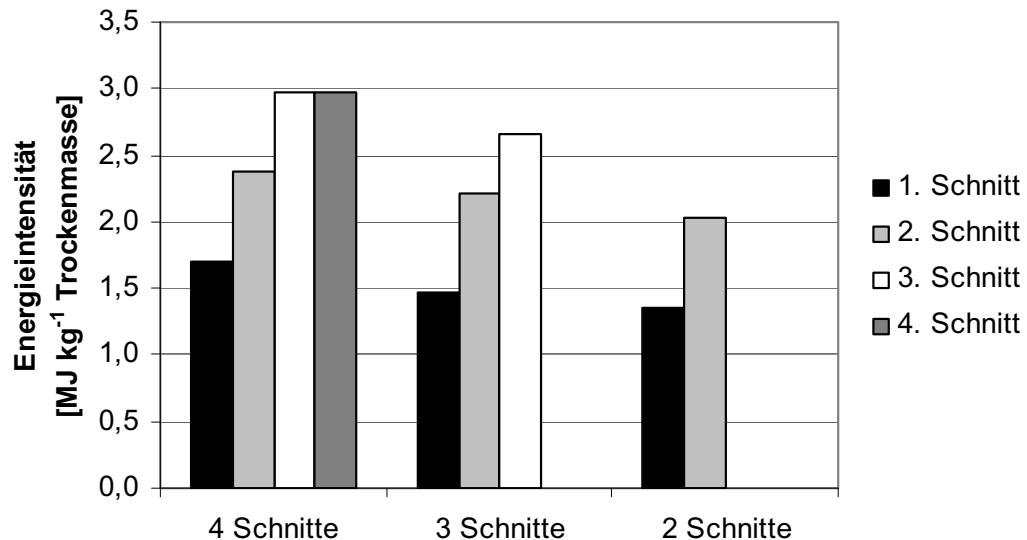


Abbildung 12: Energieintensität der einzelnen Schnitte bei der Futterbereitstellung von Grassilage in Abhängigkeit der Ernteintensität mit einem Feldhäcksler

#### 4.1.1.3 Kumulierter Energieaufwand zur Bereitstellung von Futter beim Anbau von Ackergras

Die bisherigen Untersuchungen zur Futterbereitstellung von Grassilage, Weidefutter und Heu beziehen sich, wie bereits dargestellt, auf die Nutzung von Dauergrünland. Diese Futtermittel können jedoch auch als Ackerfutter zur Verfügung gestellt werden. Diese Form des Anbaus ist im Vergleich zu der Nutzung des Dauergrünlands energetisch aufwändiger. Die zweijährige Nutzung des angebauten Ackerfutters wird unterstellt. Daraus resultiert ein Anstieg des kumulierten Energieaufwands beim Anbau von Grassilage und Heu als Ackerfutter gegenüber den gleichen Futtermitteln von Dauergrünland um 16 %. Der Anstieg des kumulierten Energieaufwands der Weidefutterbereitstellung erhöht sich unter Annahme der Ackergrasproduktion gegenüber der Dauergrünlandnutzung um 27 %.

Damit würde der kumulierte Energieaufwand zur Herstellung des Weidefutters nur noch geringfügig niedriger sein als der kumulierte Energieaufwand zur Produktion von Mais-silage.

#### 4.1.2 Verfahrensabschnitt Milchgewinnung

Der Verfahrensabschnitt Milchgewinnung setzt sich zusammen aus den drei Verfahrensbestandteilen Milchentzug, Milchkühlung sowie Reinigung und Desinfektion.

##### 4.1.2.1 *Milchentzug*

Die Kalkulationen zum indirekten Energieaufwand für den Milchentzug wurden anhand von drei verschiedenen Varianten von Fischgrätenmelkständen mit Milchleitungen und verschiedenen Arten von Melkzeugen durchgeführt. Der indirekte Energieaufwand für einen Fischgrätenmelkstand mit Schnellaustrieb ist bedeutend höher im Vergleich zu einem konventionellen. Grund für diese Differenz sind unterschiedlich hohe Gewichte und unterschiedliche eingesetzte Materialien (Tabelle 9).

Tabelle 9: Indirekter Energieaufwand von drei verschiedenen Fischgrätenmelkständen ( $2 \times 8$  Melkplätze)

Typ	Material	Masse kg	Kumulierter Energieaufwand MJ Melkplatz <sup>-1</sup>	Kumulierter Energieaufwand MJ Melkplatz <sup>-1</sup> & Jahr <sup>-1</sup>
konventionell	verzinkter Stahl	40	1.080	90
mit Schnellaustrieb	verzinkter Stahl	120	3.241	270
mit Schnellaustrieb	Edelstahl	140	5.379	448

Der indirekte Energieaufwand für die untersuchten Melkzeuge ist stark abhängig von der Masse. Die Nutzung von Edelstahl anstelle von Kunststoff bewirkt aufgrund des steigenden Gewichts einen Anstieg des indirekten Energieaufwands um 155 % (Tabelle 10).

Tabelle 10: Indirekter Energieaufwand für Melkzeuge

Typ	Masse kg	Kumulierter Energieaufwand MJ Melkeinheit <sup>-1</sup>	Kumulierter Energieaufwand MJ Melkeinheit <sup>-1</sup> & Jahr <sup>-1</sup>
Kunststoff	1,22	134	11
Kunststoff und Edelstahl	1,76	188	16
Edelstahl	2,80	289	24

Der indirekte Energieaufwand für die Milchleitung wurde unter Betrachtung der verschiedenen Materialien Edelstahl, Kunststoff und Glas kalkuliert. Mit 135 MJ pro Melkplatz und Jahr ist der indirekte Energieaufwand für eine Milchleitung aus Edelstahl am höchsten. Bedeutend geringer ist der indirekte Energieaufwand bei Einsatz von Kunststoff oder Glas mit 22 MJ beziehungsweise 6 MJ pro Melkplatz und Jahr.

JÄKEL (2003) führte Untersuchungen zum Elektroenergieaufwand in der Milchviehhaltung am Beispiel von 41 Landwirtschaftsbetrieben in Ostdeutschland durch. Für eine bessere Bewertung und Einteilung der ermittelten Daten wurden die Betriebe in Gruppen mit verschiedenen Größen geteilt: < 200, 200 bis 399, 400 bis 599 und > 600 Milchkühe. Die Datenermittlung erfolgte anhand von Befragungen und Messungen. Eine Zusammenfassung des Elektroenergieaufwands ist für den Milchentzug in Abhängigkeit der Betriebsgröße und der Melkausrüstung in Tabelle 11 gegeben. Der Vergleich der verschiedenen Melkstände zeigt, dass der Fischgrätenmelkstand im Durchschnitt den geringsten Elektroenergieaufwand pro Kuh und Jahr hat.

Tabelle 11: Elektroenergieaufwand von verschiedenen Melkausrüstungen (in Anlehnung an JÄKEL, 2003)

<b>Tierbestand</b>	<b>Melkausrüstung</b>	<b>Anzahl Betriebe</b>	<b>Milchleistung kg Kuh<sup>-1</sup> &amp; Jahr<sup>-1</sup></b>	<b>Elektroenergieaufwand kWh Kuh<sup>-1</sup> &amp; Jahr<sup>-1</sup></b>	<b>Elektroenergieaufwand kWh 100 kg<sup>-1</sup> Milch</b>
> 600	Melkkarussell	10	7.100	240	3,38
200 - 399		1	7.260	187	2,58
400 - 599	Tandemmelkstand	2	6.970	242	3,47
400 - 599	Fischgrätenmelkstand	9	6.300	166	2,63
200-399		5	6.700	260	3,88
< 200		6	6.600	237	3,59
200 - 399	Side-by-Side-Melkstand	1	6.500	269	4,14

Automatische Melksysteme (AMS) werden seit Mitte der 90er Jahre für den breiten Einsatz in der Praxis angeboten. Der Einsatz eines AMS hat Auswirkungen auf die benötigten Betriebsstoffe und Verbrauchsgüter. Dabei ist insbesondere der Elektroenergiebedarf zu nennen, denn im Vergleich zu konventioneller Melktechnik ist das AMS nahezu 24 Stunden am Tag im Einsatz. Die bisher in Anlehnung an Erfahrungswerte bzw. nach Herstellerangaben geschätzten Verbrauchswerte für Elektroenergie, Wasser und sonstige Betriebsstoffe wurden im Rahmen eines Modellvorhabens des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) "Landwirt-

schaftliches Bauen - Milchviehställe mit automatischen Melkverfahren" (KTBL, 2005) für vier Praxisbetriebe erfasst.

Tabelle 12 gibt einen Überblick über den Elektroenergieverbrauch für die Milchgewinnung der 4 Untersuchungsbetriebe. Als Mittelwert ergibt sich ein Elektroenergieverbrauch für die Milchgewinnung von 6,5 kWh pro 100 kg Milch.

Die Untersuchungen zum Elektroenergiebedarf für das Melken und die Reinigung mit einem AMS zeigen Unterschiede von bis zu 70 %, welche durch die Milchleistung der Kühe und den Typ des AMS entstehen. Der Elektroenergieaufwand für die produzierte Milch ist geringer bei steigenden Milchleistungen und Einzelmelkboxen.

Tabelle 12: Elektroenergieaufwand für die Verbraucher AMS, Kompressor und Milchkühlung (KTBL, 2005)

Betrieb Nr.	Betriebsgröße Anz. Kühe	Melkbox	Milchleistung [kg]	Elektroenergiebedarf für AMS und Reinigung [kWh 100 kg <sup>-1</sup> Milch]
1	60	1	8.233	2,72
2	80	1	7.700	3,75
3	80	3 + 1*	9.000	7,32
4	110	2	6.400	6,29

\* Mehrfachboxensystem mit 3 Melkboxen und eine Reinigungsbox

#### 4.1.2.2 Milchkühlung

Die Kalkulationen des indirekten Energieaufwandes für die Milchkühlung zeigen, dass mit einer ansteigenden Kapazität des Kühltanks der Energieaufwand abnimmt (Abbildung 13). Die Berechnung basiert auf einen Kühltank für direkte Kühlung bestehend aus Edelstahl.

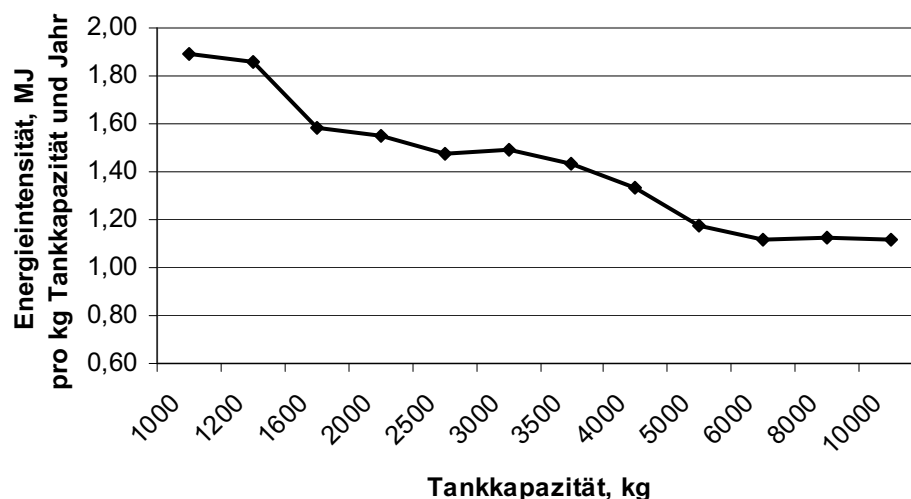


Abbildung 13: Indirekter Energieaufwand von Milchkühltanks



Der Elektroenergieaufwand für die Milchkühlung schwankt zwischen 10 und 18 % des gesamten Elektroenergiebedarfs des Landwirtschaftsbetriebes (PEEBLES ET AL., 1994). EDENS ET AL. (2003) haben für die Milchkühlung einen Elektroenergieaufwand von 2,24 kWh pro 100 kg Milch ermittelt. Untersuchungen von FARMER ET AL. (1990) beschreiben einen Schwankungsbereich von 1,76 bis 2,42 kWh pro 100 kg Milch. Der Umfang des Elektroenergieaufwands ist direkt mit der zu kühlenden Milchmenge gekoppelt (BOOR ET AL., 1988). Zur Kostenreduzierung bei der Milchkühlung wird die Verwendung einer Wasservorkühlung empfohlen (FARMER ET AL. 1990).

Die Untersuchungen von JÄKEL (2003) ergeben, dass der Elektroenergieaufwand für direkte und indirekte Kühlung sich nur gering unterscheidet (Tabelle 13).

Tabelle 13: Elektroenergieaufwand für die Milchkühlung (Tierbestand: 600 Kühe)  
(nach JÄKEL, 2003)

Milchkühlung	Durchschnittl. tägliche Nutzungsdauer Stunden	Betrieb Nr.	Durchschnittl. tägliche Milchmenge kg	Elektroenergie- bedarf kWh Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Elektro- energiebedarf kWh 100 kg <sup>-1</sup> Milch
indirekte Kühlung	18	5	16.200	121	1,72
direkte Küh- lung	14	4	16.200	101	1,60

Der Elektroenergieaufwand der Milchkühlung für die AMS variiert zwischen 1,08 und 1,68 kWh pro 100 kg Milch (KTBL, 2005). Dabei variiert der Energieaufwand in Abhängigkeit mit der Häufigkeit der Milchabholung. Betriebe mit einer täglichen Milchabholung haben einen geringeren Elektroenergieaufwand für die Kühlung als Betriebe mit seltenerer Abholung.

Untersuchungen von CLAUSEN (2000) beziehen sich auf konventionelle Melksysteme. Die betrachtete durchschnittliche jährliche Milchleistung beträgt 6.645 kg Milch pro Kuh und Jahr. Die Kalkulationen zeigen, dass der Elektroenergieaufwand der Eiswasserkühlung proportional mit der Milchmenge zunimmt. Eine Vorkühlung der Milch bewirkt eine Reduzierung des Elektroenergieaufwands bei gleichbleibender Milchmenge um 40 %. Die indirekte Milchkühlung benötigt einen 15 % bis 20 % höheren Energieaufwand gegenüber der direkten Kühlung. Ursachen dafür sind einerseits Wärmeverluste im Eiswasserlager und andererseits der zusätzliche Wärmeaustauschprozess zwischen Kühler und Wasser.

DE KONING ET AL. (2002) haben Milchkühlungssysteme für automatische Melksysteme untersucht. Die Betrachtungen zeigen, dass der Elektroenergieaufwand für ein indirektes Kühlungssystem höher ist als für ein System mit Puffer und Kühltank (Tabelle 14).

Tabelle 14: Elektroenergieaufwand verschiedener Milchkühlungssysteme für automatische Melksysteme (DE KONING ET AL., 2002)

Kühlsystem	Elektroenergieaufwand kWh 100 kg <sup>-1</sup> Milch
Indirekte Kühlung mit Wärmerückgewinnung (Versuchsbetrieb)	1,95
Direkte Kühlung mit Wärmerückgewinnung und Vorkühlung* (Versuchsbetrieb)	1,25 - 1,35
Kombination Puffer und Kühltank mit Wärmerückgewinnung (Praxisbetrieb)	1,66

\* Energieeinsparung durch Vorkühlung ist auf 0,6 bis 0,7 kWh 100 kg<sup>-1</sup> Milch geschätzt

#### 4.1.2.3 Reinigung und Desinfektion

Der Energieaufwand für Reinigung und Desinfektion ist stark beeinflusst von der Milchmenge (Tabelle 15; JÄKEL, 2003). Weiterhin sind die Länge und der Durchmesser der Milchleitungen entscheidend für den Elektroenergieaufwand für Reinigung und Desinfektion. Die Wassererwärmung aus der Milchkühlung führt zu einer Reduzierung des Elektroenergieaufwands.

Der Unterschied des Elektroenergieaufwands zwischen der Zirkulationsreinigung und der Kochendwasserreinigung ist unbedeutend (CLAUSEN, 2000).

Die Untersuchungen von EDENS ET AL. (2003), bezogen auf Wassererwärmung für Reinigung und Desinfektion, ergeben einen Energieaufwand von 0,29 kWh pro 100 kg Milch.

Tabelle 15: Elektroenergieaufwand für Reinigung und Desinfektion (nach JÄKEL, 2003)

Betriebsgröße Anzahl Kühe	Durchschnittliche tägliche Milchmenge kg	Elektroenergieaufwand kWh Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	Elektroenergieaufwand kWh 100 kg <sup>-1</sup> Milch
> 600	10.700	23,18	0,52
400 - 599	6.700	32,64	0,50
200 - 399	4.150	62,22	1,08
< 200	1.480	50,84	1,02

#### 4.1.2.4 Energieintensität des Verfahrensabschnitts Milchgewinnung

Die Literaturrecherche hat ergeben, dass die Höhe des Elektroenergieaufwands für Milchentzug, Milchkühlung sowie Reinigung und Desinfektion in Abhängigkeit von der Betriebsgröße, den eingesetzten Maschinen und der technischen Ausrüstung sowie dem Betriebsmanagement variiert. Die ermittelten Werte für das Verfahren Milchgewinnung liegen zwischen 5,0 (CLAUSEN, 2000; EDENS ET AL., 2003) und 6,2 kWh pro 100 kg Milch (JÄKEL, 2003). Für automatische Melksysteme ist der Energieaufwand durchschnittlich 25 % höher als für konventionelle Systeme.

Basierend auf der Literaturrecherche wird für das Standardverfahren der kumulierte Energieaufwand für die Nutzung eines Fischgrätenmelkstandes, direkter Milchkühlung und einer Zirkulationsreinigung betrachtet. Daraus ergibt sich ein Elektroenergieaufwand von 5,6 kWh pro 100 kg Milch. Der indirekte Energieaufwand beträgt weniger als ein Hundertstel des direkten Energieaufwandes.

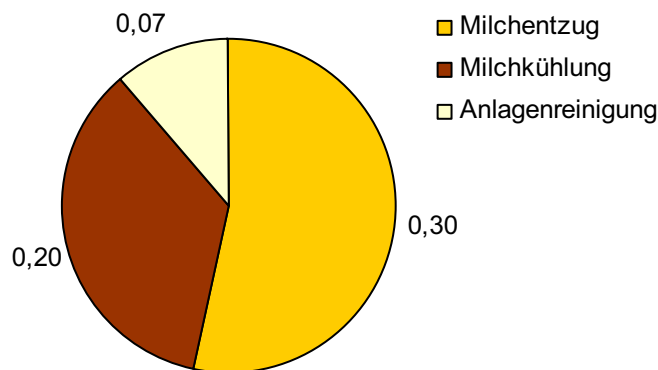


Abbildung 14: Kumulierter Energieaufwand für die Milchgewinnung [MJ kg<sup>-1</sup> Milch]

Als Energieäquivalent wird der deutsche Strommix zur Herstellung von Elektroenergie nach GEMIS (2006) mit 10,3 MJ pro kWh angesetzt.

Somit ergibt sich eine Energieintensität von 0,57 MJ pro kg Milch (Abbildung 14).

#### 4.1.3 Verfahrensabschnitt Gebäude und bauliche Anlagen

Die Kalkulationen für den kumulierten Energieaufwand der Gebäude wurden für vier typische Stallgebäude der Milchviehhaltung durchgeführt. Die vier verschiedenen Gebäudetypen (Abbildung A1) haben die gleiche Fußbodengestaltung mit Spaltenböden und ein Melkhaus. Unterschiede bestehen in den Gebäudehüllen, die für das Standardverfahren wie folgt definiert sind:

Gebäudetyp 1 ist ein geschlossener Kaltstall. Die Stützen und Wände sind aus Holz, der Dachbelag besteht aus Wellfaserzementplatten mit Lichtkuppelfirst. Es ist eine typische Bauweise für neuere Milchviehställe in Deutschland.

Der zweite Gebäudetyp ist ein Außenklimastall. Eine Seitenwand des Gebäudes ist komplett geöffnet und eine der beiden Giebelseiten ist mit einem Windschutznetz versehen. Die anderen Wände bestehen aus Holz. Der Dachbelag besteht aus Wellfaserzementplatten und einem Lichtkuppelfirst. Dieser Stalltyp gewinnt in Deutschland immer mehr an Bedeutung.

Gebäudetyp 3 ist ein geschlossener Warmstall. Wichtige charakteristische Merkmale sind die Stützen aus Stahlbeton, die Außenwände aus Beton und die Dacheindeckung mit Wellfaserzementplatten. Im Unterschied zu einem nicht-wärmeisolierten Gebäudetyp (Gebäudetyp 1) hat der kalkulierte Warmstall eine Zwischendecke. Diese Zwischendecke besteht aus Faserzementplatten und Wärmeisolierung. Dieser Stalltyp ist sehr verbreitet in Deutschland, hauptsächlich als älteres Betriebsgebäude.

Der vierte Gebäudetyp ist ein Leichtbaustall, der sich vollständig von den anderen Gebäudetypen unterscheidet. Die Gebäudehülle besteht aus einer Stahlkonstruktion überzogen mit einer Folie. Für die Kalkulationen wurden Giebelwände aus Holz zugrunde gelegt, wobei auch andere Materialien eingesetzt werden könnten. Dieser Gebäudetyp hat in der Milchviehhaltung Deutschlands praktisch keine Verbreitung.

Der kumulierte Energieaufwand der vier verschiedenen Gebäudetypen ist in Abbildung 15 dargestellt. Der geschlossene Kaltstall und der Außenklimastall haben den gleichen Energieaufwand, daher sind sie in der Abbildung zusammengefasst. Der Warmstall hat einen etwas höheren Energieaufwand als die anderen Gebäudetypen. Die Ursachen dafür liegen in der massiven Baukonstruktion mit den Stahlbetonstützen, den Wänden aus Beton und der Zwischendecke. Der Leichtbaustall hat aufgrund seiner einfachen Konstruktion einen etwas geringeren Energieaufwand als die anderen Varianten. Die Gestaltung des Fußbodens hat einen wesentlich höheren Einfluss auf den Energieaufwand der Gebäude. Der Anteil der Güllekanäle und Spaltenboden am Gesamtenergieaufwand der Gebäude beträgt ein Drittel.

Abbildung 16 zeigt den kumulierten Energieaufwand der einzelnen Gebäudebestandteile der Gebäudehüllen in Beziehung zum Gesamtenergieaufwand der Gebäude. Bei allen Gebäudetypen werden für die Fußbodengestaltung mehr als zwei Drittel des Energieaufwands eingesetzt. Zwischen dem geschlossenen Kaltstall und dem Außenklimastall sind kaum Unterschiede bei der Aufteilung des Energieaufwandes festzustellen.

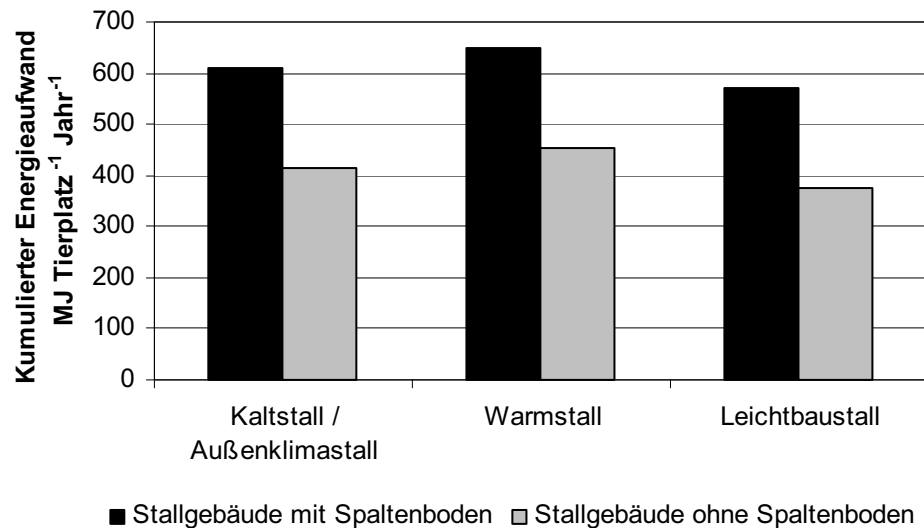


Abbildung 15: Kumulierter Energieaufwand unterschiedlicher Stallgebäudetypen für verschiedene Stallfußbodenausführungen

Aber im Vergleich mit den anderen Gebäudetypen bestehen Unterschiede. Der kumulierte Energieaufwand für die Gebäudehülle des Warmstalls ist 40 % höher, der vom Leichtbaustall ist 40 % geringer als der Energieaufwand der Gebäudetypen 1 und 2. In die Berechnung zum kumulierten Energieaufwand des Standardverfahrens wird der Energieaufwand zur Herstellung eines Kaltstalls einbezogen (Tabelle A6, Anhang C - Milchvieh).

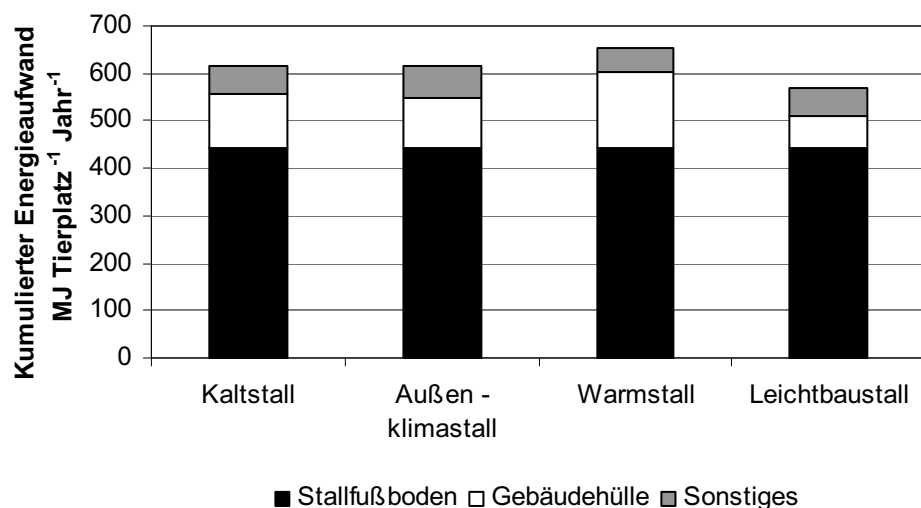


Abbildung 16: Kumulierter Energieaufwand der einzelnen Gebäudebestandteile der unterschiedlichen Gebäudetypen mit Spaltenboden

Die Betrachtung der Lagerstätten erfolgt getrennt nach Futterlager und Exkrementlager. Für beide Untersuchungen werden unterschiedliche Behälter mit verschiedenen Baumaterialien betrachtet. Der Vergleich des Energieaufwandes für den Lagerraum pro  $\text{m}^3$  Futtermittel beziehungsweise Exkrement basiert jeweils auf der gleichen Kapazität der einzelnen baulichen Anlagen.

Die Berechnungen zum Energieaufwand erfolgen getrennt in Lager für Kraftfutter und Grundfutter (Abbildung 17). Grundfutter wird in Deutschland überwiegend in Flachsilo gelagert. Diese Flachsilo werden aus Beton oder auch aus Stahlbeton gebaut. Der kumulierte Energieaufwand pro  $\text{m}^3$  Futter ist bei einem Flachsilo aus Beton etwas niedriger als bei einem aus Stahlbeton hergestellten. Hochsilo werden in Deutschland nicht häufig als Lager für Grundfutter genutzt. Untersuchungen zum kumulierten Energieaufwand erfolgen am Beispiel von drei unterschiedlichen Baumaterialien für die Hochsilo. Die drei Beispiele haben den gleichen Boden aus Beton. Unterschiede bestehen in der Bauwerkshülle. Den geringsten Energieaufwand pro  $\text{m}^3$  Futter hat ein Hochsilo mit einer Bauwerkshülle aus Stahl. Der Energieaufwand für ein Hochsilo mit einer Bauwerkshülle aus Beton ist etwas höher. Der Energieaufwand eines Hochsilo aus Kunststoff ist sieben Mal höher als der Energieaufwand für das Hochsilo aus Stahl. Der kumulierte Energieaufwand für die Lagerung von Grundfutter schwankt zwischen 7 und 50  $\text{MJ pro m}^3$ . Im Durchschnitt ist der Energieaufwand in Hochsilo höher als in Flachsilo. Ursache dafür ist die übliche Größe der baulichen Anlagen, da Flachsilo häufig höhere Kapazitäten haben als Hochsilo.

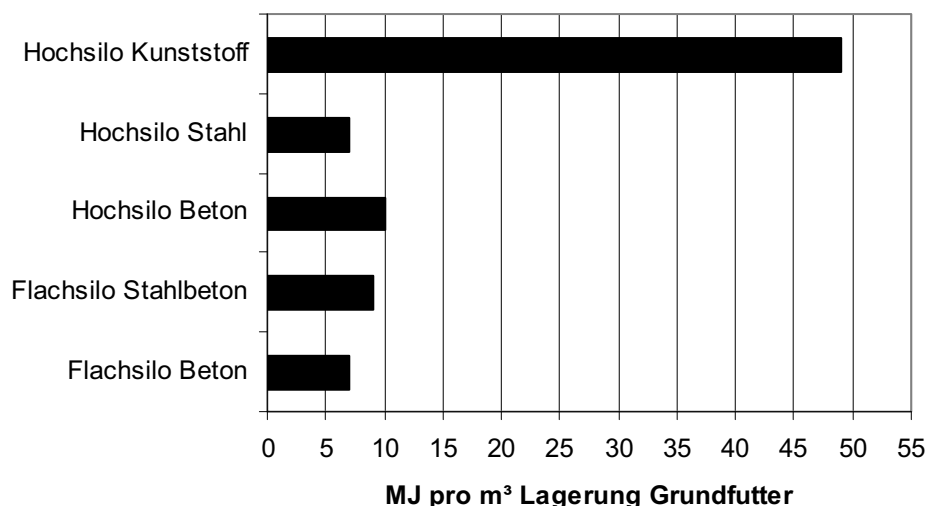


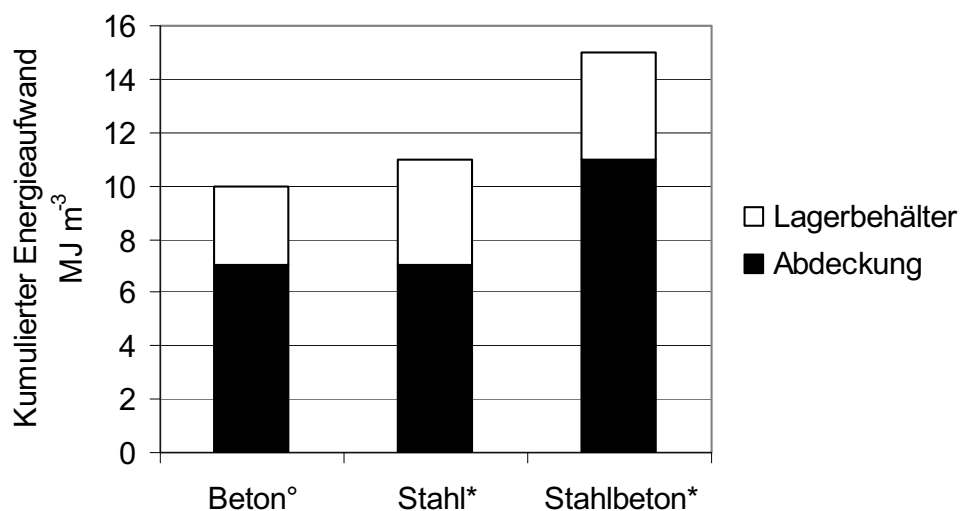
Abbildung 17: Kumulierter Energieaufwand für die Grundfutterlagerung pro  $\text{m}^3$

Weitere Kalkulationen erfolgen für die Lagerung von Kraftfutter in Hochsilo aus Stahl beziehungsweise Kunststoff. Der kumulierte Energieaufwand für den Lagerbehälter aus

Stahl ist bedeutend geringer als für den, der aus Kunststoff besteht. Insgesamt ist der Energieaufwand für die Lagerung von einem m<sup>3</sup> Kraftfutter bis zu 150 % höher als die Lagerung von Grundfutter.

Die Lagerung der Exkremente erfolgt in Abhängigkeit des Haltungssystems der Tiere und ist somit geteilt in die Lagerung von Flüssigmist und Festmist. Der Energieaufwand für die Lagerung von Flüssigmist in Güllebehältern wurde untersucht. Als unterschiedliche Baumaterialien für Güllebehälter sind Beton, Stahlbeton und Stahl berücksichtigt. Der kumulierte Energieaufwand für die verschiedenen Güllebehälter beträgt zwischen 7 und 11 MJ pro m<sup>3</sup> Güllelagererraum. Dabei ist der Energieaufwand der Güllebehälter aus Beton und Stahl nahezu gleich und der Energieaufwand für den Behälter aus Stahlbeton etwas höher.

Abdeckungen von Güllebehältern erhöhen den Energieaufwand. Wobei eine Abdeckung aus Beton einen 25 % geringeren Energieaufwand benötigt als eine Abdeckung aus Kunststoff. Der kumulierte Energieaufwand für die verschiedenen Güllebehälter mit Abdeckung beträgt zwischen 10 und 15 MJ pro m<sup>3</sup> Gülle (Abbildung 18).



°Abdeckung aus Beton

\*Abdeckung aus Kunststoff

Abbildung 18: Kumulierter Energieaufwand für unterschiedliche Güllelager

Für die Festmistlagerung wird überwiegend eine betonierte Bodenplatte genutzt. Typische Materialien sind dabei Beton und Stahlbeton. Für die Lagerung von einem m<sup>3</sup> Festmist wurde ein kumulierter Energieaufwand von 5 bis 8 MJ ermittelt. Mit einer dreiseitigen Umrahmung der Bodenplatte steigt der Energieaufwand um 20 % an.

Für das Standardverfahren sind die Lagerung von Grundfutter im Flachsilo aus Beton und die Lagerung von Kraftfutter im Hochsilo aus Beton berücksichtigt. Die Lagerung der Gülle ist für einen Güllebehälter aus Beton ohne Abdeckung einbezogen. Für das Standardverfahren wird eine Energieintensität von  $0,02 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch für die benötigten baulichen Anlagen ermittelt (Tabelle 16).

Tabelle 16: Energieintensität für bauliche Anlagen

Lager	Energieaufwand [MJ m <sup>-3</sup> ]	Energieaufwand [MJ Tierplatz <sup>-1</sup> ]	Energieintensität [MJ kg <sup>-1</sup> Milch]
Grundfutterlager	7	36	0,01
Kraftfutterlager	7	6	0,001
Güllelager	7	62	0,012

#### 4.1.4 Verfahrensabschnitt Maschinen und technische Ausrüstung

Die Kalkulation des Energieaufwands der technischen Ausrüstung erfolgte adäquat zur Ermittlung des Energieaufwands der Gebäude und baulichen Einrichtungen. Abbildung 19 zeigt den Energieaufwand der einzelnen Bestandteile der technischen Ausrüstung. Der kumulierte Energieaufwand der gesamten technischen Ausrüstung beträgt 475 MJ pro Tierplatz und Jahr. Mit über 75 % nimmt die Gummiliegematte den höchsten Anteil am kumulierten Energieaufwand ein. Wenn anstelle von Gummiliegematten Sand als Liegematerial verwendet wird, dann beträgt der Energieaufwand für die technische Ausrüstung nur 112 MJ pro Tierplatz und Jahr. Der Energieaufwand für Sand als Liegematerial ist nur ein Hundertstel des Energieaufwandes der Gummiliegematten.

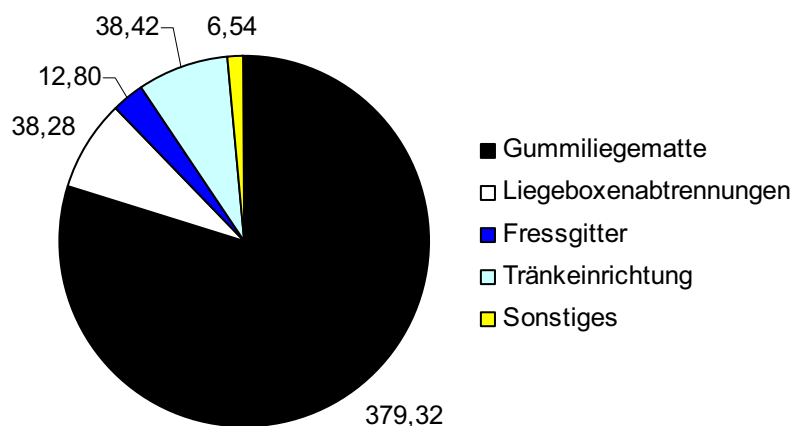


Abbildung 19: Kumulierter Energieaufwand für die technische Ausrüstung im Milchproduktionsverfahren [MJ Tierplatz<sup>-1</sup> und Jahr<sup>-1</sup>]



Die Untersuchungen zum kumulierten Energieaufwand für den Maschineneinsatz in der Tierhaltung umfassen die Bereiche Futterentnahme, Futtervorlage, Restfutterbeseitigung, Weidehaltung, Entmistung und Einlagerung der Exkrememente. Die Berechnungen wurden anhand von drei unterschiedlichen Varianten durchgeführt.

Als erste Variante findet die ganztägige Stallhaltung in einem Stallgebäude mit Spaltenboden und Flüssigentmistung Berücksichtigung.

Ausgangsbasis für die zweite Variante ist ebenfalls ein Stallgebäude mit Flüssigentmistung, jedoch in Kombination mit halbtägiger Weidehaltung der Tiere im Sommer.

Die dritte Variante bezieht sich auf ein Stallgebäude mit Festmist und ganzjähriger Stallhaltung der Tiere.

In Abbildung 20 wird die Zusammensetzung des Energieaufwands für die Maschinen in der Tierhaltung für die genannten drei Varianten dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass Variante 2 mit Weidehaltung einen geringeren Energieaufwand hat als die beiden Varianten mit ganzjähriger Stallhaltung. Der Energieaufwand von Variante 3 ist dabei am höchsten, wenn auch die Unterscheidung zu Variante 1 nur gering ist.

Der Energieaufwand für die Fütterung einer Totalmischration mit dem Futtermischwagen nimmt mit etwa 85 % den größten Anteil am kumulierten Energieaufwand der einzelnen Varianten ein.

Der Energieaufwand für die Maschinen zur Entmistung eines Stallgebäudes mit Festmist ist um etwa 4 % höher als der zur Entmistung eines Stallgebäudes mit Flüssigentmistung.

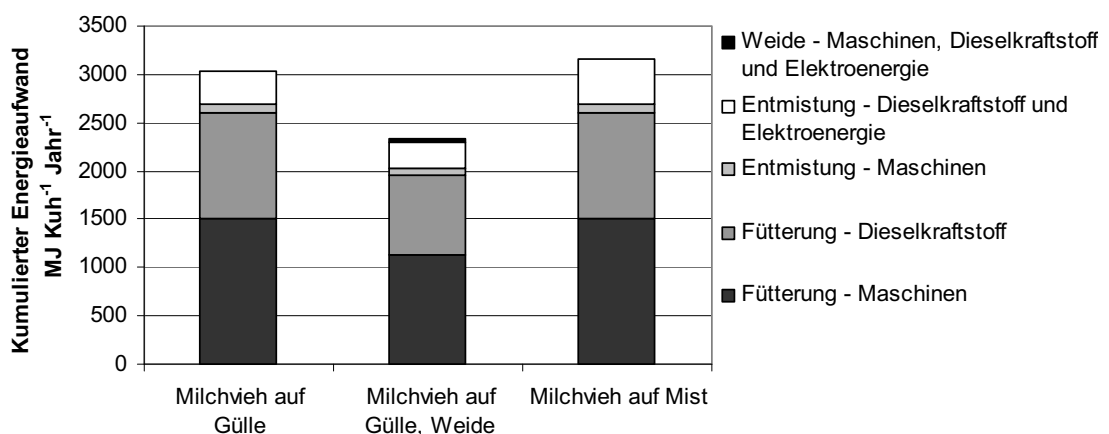


Abbildung 20: Kumulierter Energieaufwand für die Maschinen in der Milchviehhaltung

#### 4.1.5 Verfahrensabschnitt Nachzucht

In den meisten Milchviehbetrieben erfolgt die Bestandsergänzung der Milchkühe durch die innerbetriebliche Aufzucht der weiblichen Nachzucht. Nur Jungrinder mit gesunder und gut entwickelter Kondition bieten die Voraussetzungen für eine hohe und ausdauernde Leistung. Fehler in der Aufzucht lassen sich später kaum ausgleichen und verteuern die Bestandsergänzung erheblich. Das anzustrebende Erstkalbealter im Einzelbetrieb hat sich an dem Wachstumsvermögen der Tiere, den betrieblichen Voraussetzungen und den ökonomischen Erfordernissen zu orientieren. Aus biologischer und ökonomischer Sicht ist ein Erstkalbealter zwischen 24 und 27 Monaten vorteilhaft (SPIEKERS & POTTHAST, 2004). Aus heutiger Sicht wird ein Erstkalbealter von 25 Monaten empfohlen, welches für die Berechnung im Standardverfahren als Grundlage gesehen wird. In der Standardration ist das Alter der Jungrinder von 5 bis 25 Monaten definiert. Zum Verfahrensabschnitt Nachzucht gehören auch die Kälber von 0 bis 5 Monaten.

##### 4.1.5.1 *Futterbereitstellung*

Für die Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes im Verfahrensabschnitt Nachzucht wurden verschiedene Futterrationen untersucht. Grundlage der Rationsgestaltung ist eine ausgeglichene wiederkäuergerechte Fütterung unter Beachtung des Rohfasergehalts, der ruminalen Stickstoffbilanz und der Trockenmasseaufnahme.

Die Aufzuchtperiode der Kälber bezieht sich auf die ersten 16 Wochen. Die Kälber haben in diesem Zeitraum unterschiedliche Bedürfnisse an die Fütterung. Daher findet eine weitere Einteilung in drei verschiedene Altersklassen statt: < 1 Woche, 1 bis 10 Wochen und 11 bis 16 Wochen. In der ersten Woche erhalten die Kälber Kolostralmilch. Für die Fütterung der Altersklasse 1 der Kälber wird ein kumulierter Energieaufwand von 24 MJ pro Kalb und Tag benötigt. In dem Zeitraum der Altersklasse 2, der Kälber, wird eine mit Milchaustauscher angesetzte Tränke gefüttert. Das heißt jedes Kalb bekommt etwa 30 kg Milchaustauscher (SPIEKERS & POTTHAST, 2004), etwas Heu und Kraftfutter. Der kumulierte Energieaufwand pro Kalb und Tag beträgt in Altersklasse 2 43 MJ. Ab Altersklasse 3 erhalten die Kälber weder Milch noch Milchaustauscher. Typische Bestandteile der Ration sind Grassilage, Maissilage und Kraftfutter. Daraus ergibt sich ein kumulierter Energieaufwand für die Altersklasse 3 in Höhe von 10 MJ pro Kalb und Tag.

Aufgrund der betrieblichen Situation ist für viele Betriebe der Einsatz von Weidefutter bei Jungrindern von besonderer Bedeutung. Bei der Rationsplanung für die Jungrinder

des Standardverfahrens wurde daher eine Weidefütterung im Sommer vorgesehen. Die Fütterung erfolgt als Total-Misch-Ration (TMR), denn dadurch kann die Energie- und Nährstoffversorgung gezielt gesteuert werden. Insgesamt ist die Futterrationsration an die Bedürfnisse der Tiere angepasst. Komponenten in der Futterrationsration für die Jungrinder sind in ausgeglichenem Maß Grassilage und Maissilage, Weidefutter und Kraftfuttermittel. Die Aufzuchtperiode der Jungrinder wird ebenfalls nach ernährungsphysiologischen Gesichtspunkten in 3 Altersklassen geteilt: 5 Monate < 1 Jahr, 1 bis 2 Jahre und > 2 Jahre. Der durchschnittliche kumulierte Energieaufwand pro Jungvieh beträgt 9,7 MJ am Tag für den Zeitraum von 5 Monaten bis 25 Monaten mit Weidefütterung im Sommer.

Tabelle 17 zeigt ein Beispiel einer Ration für Jungvieh der Altersklasse 2 ohne Weidefütterung. Eine Futterrationsration für Jungvieh derselben Altersklasse jedoch mit Weidefütterung im Sommer beträgt 10,3 MJ pro Tier und Tag. Das bedeutet, dass die Futterrationsration mit Weide nur zwei Drittel des Energieaufwandes der Ration ohne Weidefütterung benötigt.

Tabelle 17: Kumulierter Energieaufwand einer Futterrationsration für Jungvieh in der Altersklasse 2 für ganzjährige Stallfütterung

Futtermittel	Energieintensität MJ kg <sup>-1</sup> TM <sup>1**</sup>	Futterraufnahme kg TM <sup>**</sup> Tier <sup>-1</sup> Tag <sup>-1</sup>	KEA <sup>*</sup> MJ Tier <sup>-1</sup> Tag <sup>-1</sup>
Grassilage	1,99	4,0	7,95
Maissilage	1,66	3,0	4,98
Weide	0,84	-	-
Kraftfutter	3,58	0,5	1,79
Summe		7,5	14,7

\* kumulierter Energieaufwand

\*\* Trockenmasse

#### 4.1.5.2 Gebäude

Während der Aufzuchtperiode der Kälber und des Jungviehs werden unterschiedliche Gebäudebedingungen benötigt. Aus hygienischen Gründen wird empfohlen die Jungtiere nicht im gleichen Stallgebäude aufzuziehen wie die Milchkühe. Ebenso ist die getrennte Haltung von Kälbern und Jungvieh aus hygienischen Gesichtspunkten empfehlenswert.

Auch wenn in der Praxis Landwirte häufig alte Gebäude für die Haltung von Kälbern und Jungvieh genutzt werden, wird in den Untersuchungen dieser Arbeit der kumulative Energieaufwand für neue Stallgebäude ermittelt. Die Kalkulationen zum Energieauf-

wand der Gebäude in Abschnitt 4.1.3 haben bereits gezeigt, dass die Gebäudehülle nur einen sehr geringen Einfluss auf den kumulierten Energieaufwand ausübt. Daher beschränken sich die Kalkulationen zum kumulierten Energieaufwand der Gebäude im Bereich Nachzucht auf den Stalltyp Kaltstall. Die Gebäudeskizzen der Ställe befinden sich im Anhang C.

Der Kälberstall sowie der Jungviehstall sind geschlossene, nicht-wärmeisolierte Kaltställe, welche beispielhaft für neuere Rinderställe in Deutschland sind. Die Stützen und Wände sind aus Holz, das Dach ist mit Faserzementplatten eingedeckt und hat eine Lichtbandöffnung am First.

Die Unterbringung der Kälber erfolgt entsprechend den drei Altersklassen. Der Kälberstall bietet in Anpassung an das Standardverfahren 43 Tierplätze. Kälber bis zu zwei Wochen werden in Kälberboxen gehalten. Danach erfolgt die Haltung in Gruppen. Die Liegefläche ist mit Stroh eingestreut. Die Altersklasse 3 wird in einem Bereich mit Liegeboxen und Spaltenboden gehalten. Vorteilhaft ist, dass die Kälber sehr früh an die Haltung in Liegeboxen gewöhnt werden. Der Kälberstall beinhaltet somit zwei Entmistungssysteme. Der kumulierte Energieaufwand für den Kälberstall beträgt 303 MJ pro Tierplatz und Jahr.

Angemessen an das Kaltstallgebäude und die technische Ausrüstung des Standardverfahrens wird der Energieaufwand für den Jungviehstall ermittelt. Dieser Stall ist mit Spaltenboden und Güllekanälen ausgestattet. Das Stallgebäude enthält drei Abteile entsprechend den drei Altersklassen des Jungviehs und ist für 132 Tierplätze ausgerüstet. Für die aufwachsenden Tiere sind unterschiedliche Liegeboxengrößen berücksichtigt. Der kumulative Energieaufwand für den Jungviehstall beträgt 444 MJ pro Tierplatz und Jahr. Ein Stallgebäude ohne Spaltenboden würde einen 30 % geringeren kumulierten Energieaufwand benötigen.

#### 4.1.5.3 *Maschinen und technische Ausrüstung*

Die Berechnungen zum kumulierten Energieaufwand der technischen Ausrüstung im Kälberstall haben ergeben, dass pro Tierplatz und Jahr 100 MJ aufgewendet werden. Mit 60 % hat die Gummiliegematte den höchsten Anteil am kumulierten Energieaufwand der technischen Ausrüstung, die Tränkeinrichtung benötigt etwa 30 %.

Der kumulative Energieaufwand der technischen Ausrüstung im Jungviehstall beträgt 220 MJ pro Tierplatz und Jahr. Davon nimmt die Gummiliegematte einen Anteil von etwa 75 % ein und die Tränkanlage ein Fünftel (Abbildung 21).

Sand als Liegematerial würde nur ein Hundertstel des Energieaufwandes der Gummiliegematte benötigen.

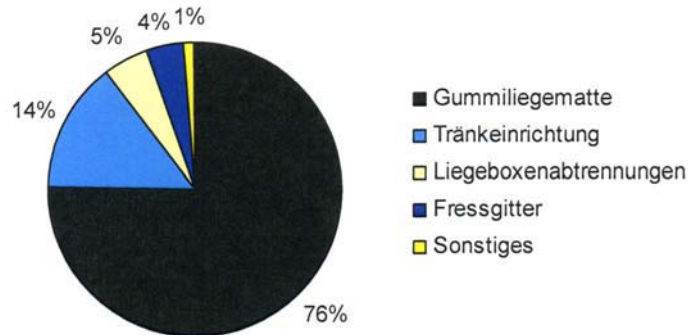


Abbildung 21: Kumulierter Energieaufwand der technischen Ausrüstung (220 MJ Tierplatz<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup>)

Die Heizleistung der Kälbertränkautomaten ist normalerweise zwischen 2,0 und 3,8 kW (KUNZ, 1999). In die Berechnungen für das Standardverfahren wurde ein Kälbertränkautomat mit einer Heizleistung von 2,7 kW einbezogen. Der Energieaufwand für die Fütterung während der Haltungsperiode eines Kalbs mit dem Kälbertränkautomat für die beschriebene Ration beträgt 53 MJ.

Der kumulierte Energieaufwand für Maschinen, die zur Futterentnahme, Fütterung, Entmistung beziehungsweise zur Versorgung der Tiere auf der Weide notwendig sind, beträgt pro Kalb 713 MJ und pro Jungvieh 1.353 MJ.

#### 4.1.5.4 Energieintensität des Verfahrensabschnitts Nachzucht

Der kumulierte Energieaufwand für die Aufzucht einer Färse mit einer Aufzuchtperiode von 25 Monaten beträgt insgesamt 12.797 MJ. Die Futterbereitstellung benötigt mit drei Viertel den größten Anteil am kumulierten Energieaufwand für die Aufzucht der Färse (Abbildung 22).

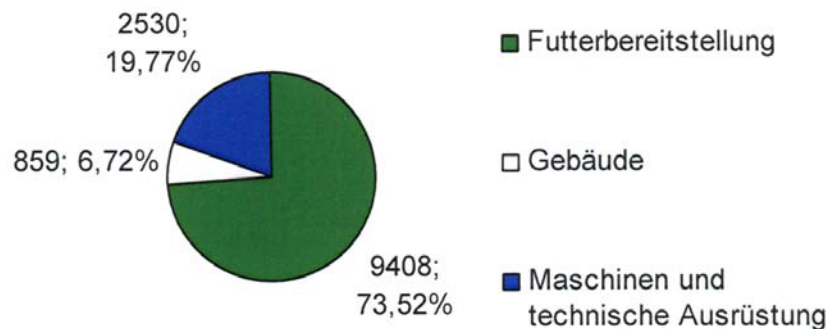


Abbildung 22: Kumulierter Energieaufwand zur Färsenaufzucht (0 bis 25 Monate) in MJ pro Färse

Insgesamt wird für den Verfahrensabschnitt Nachzucht eine Energieintensität von  $0,70 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch ermittelt. Abbildung 23 zeigt eine Aufschlüsselung der Zusammensetzung der Energieintensität des Verfahrensabschnitts Nachzucht. Entsprechend der im Standardverfahren definierten Aufzuchtdauer und Reproduktionsrate ist die Zuordnung des Energieaufwands der Nachzucht erfolgt.

Im Bereich Nachzucht bildet der Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung mit 73 % den größten Anteil. Die Bereitstellung wirtschaftseigener Futtermittel umfasst dabei 48 %. Es ist deutlich zu erkennen, dass hier der Anteil von Mineraldünger mit 29 % am höchsten ist. Der Anteil des Energieaufwandes für Stickstoffdünger beträgt mehr als die Hälfte des Energieaufwands für den eingesetzten Mineraldünger. Der Anteil der Zukauffuttermittel ist mit einem Viertel des kumulierten Energieaufwands ebenfalls bedeutend. Mit insgesamt 38 % nehmen die Maschinen mit dem dazugehörigen Dieselkraftstoff zusammengefasst für die Bereiche Pflanzenbau und Tierhaltung den höchsten Anteil am kumulierten Energieaufwand des Verfahrensabschnitts Nachzucht ein.

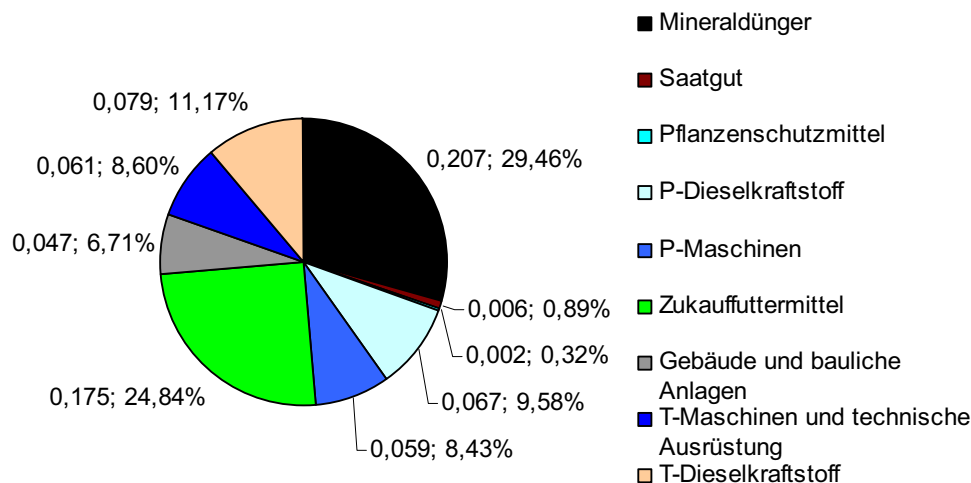


Abbildung 23: Energieintensität Nachzucht (Tabelle A8) [ $\Sigma 0,70 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch]

#### 4.1.6 Energieintensität des Standardverfahrens

Die Energieintensität für das Standardverfahren beträgt  $3,54 \text{ MJ pro kg}^{-1}$  Milch. In Abbildung 24 ist die Aufteilung des Energieaufwandes in dessen bedeutendste Anteile dargestellt. Bei der Betrachtung der detaillierten Aufteilung des kumulierten Energieaufwands übergreifend über die einzelnen Verfahrensabschnitte wird deutlich, dass der Energieaufwand, der zur Futterbereitstellung notwendig ist, insgesamt 65 % beträgt. Dazu zählt jeglicher Energieaufwand, der zum Pflanzenbau und für die Bereitstellung der Zukauffuttermittel aufgewendet wird. Besonders hervorzuheben ist der hohe Anteil

der Zukauffuttermittel sowie des Mineraldüngers am kumulierten Energieaufwand. Einen weiteren bedeutenden Anteil am kumulierten Energieaufwand haben mit insgesamt 31 % die Maschinen mit der technischen Ausrüstung und der dazugehörige Dieselmotorkraftstoff aus dem pflanzenbaulichen und dem Tierhaltungsbereich.

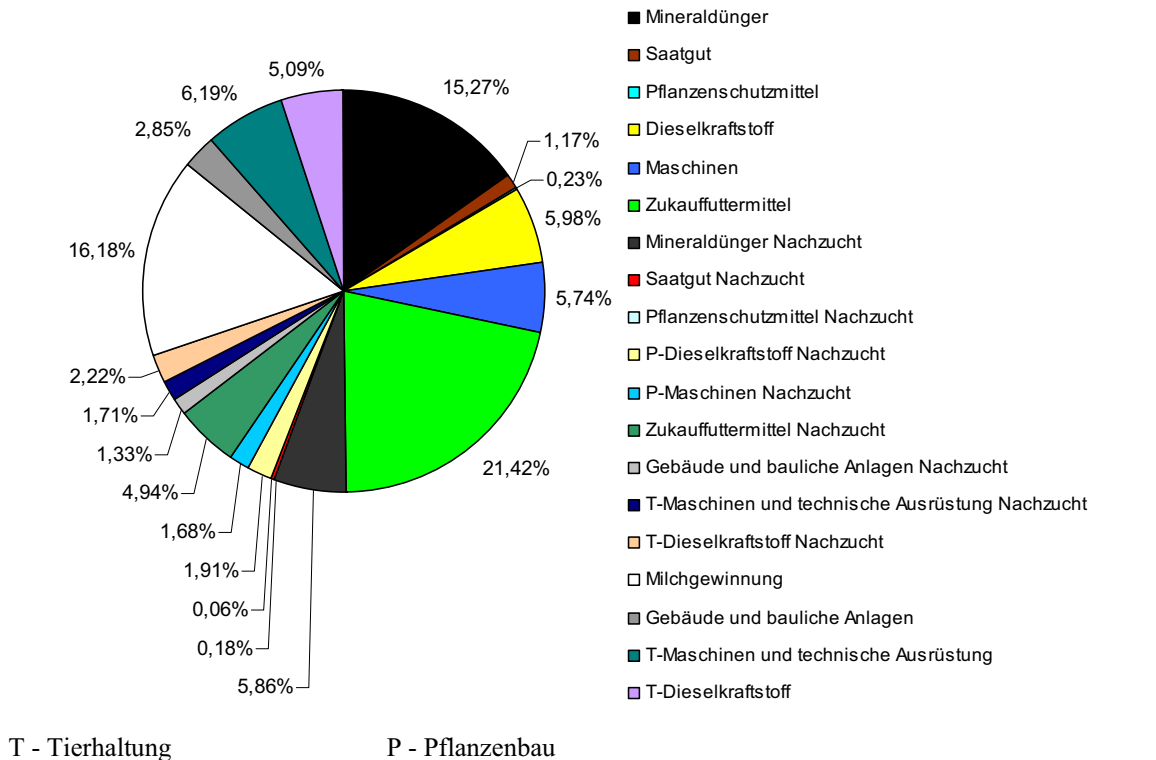


Abbildung 24: Kumulierter Energieaufwand Standardverfahren  
[28.315 MJ Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup>] (Tabelle A12)

#### 4.2 Energieintensität der Milchproduktion in Abhängigkeit verschiedener Milchleistungen

Der kumulierte Energieaufwand der Futterbereitstellung pro kg Milch nimmt bei Milchleistungen von 4.000 bis 8.000 kg Milch pro Kuh und Jahr ab (Abbildung 25). Mit höheren Milchleistungen verringert sich dieser Effekt. Die ansteigenden Milchleistungen können den höheren Energieaufwand der Futterrationen nicht mehr kompensieren, weil mit zunehmender Milchleistung der Anteil der energieaufwändigeren Kraftfuttermittel in den Rationen zunimmt.

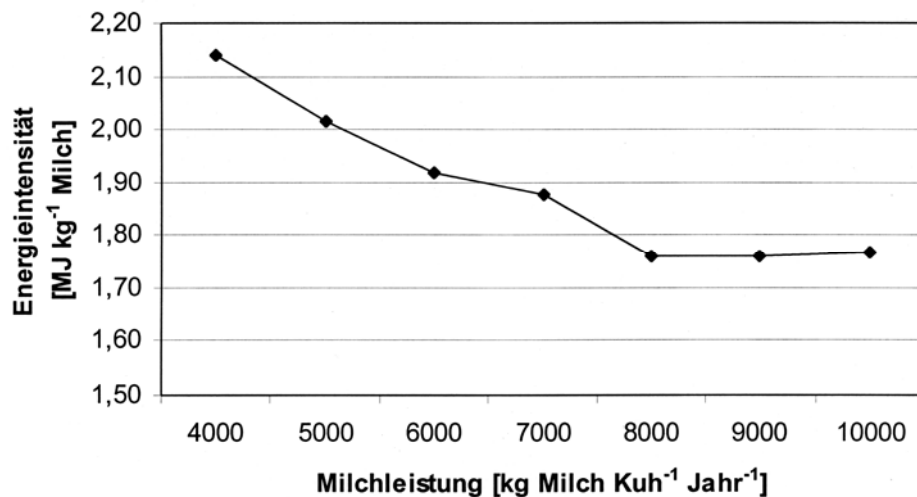


Abbildung 25: Energieintensität für die Futterbereitstellung in Abhängigkeit der Milchleistung

#### 4.3 Energieintensität der Milchproduktion in Abhängigkeit der Reproduktionsrate

Der Verfahrensabschnitt Nachzucht nimmt mit etwa 20 % den zweithöchsten Anteil am kumulierten Energieaufwand in der Milchviehhaltung ein. Die folgenden Untersuchungen betrachten den Einfluss unterschiedlicher Reproduktionsraten und Milchleistungen auf die Energieintensität des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung (Tabelle 18). Hierbei wird der kumulierte Energieaufwand für die Futterbereitstellung von der Milchkuh berücksichtigt. Entsprechend der Reproduktionsraten werden für die Nachzucht die Aufzuchtmonate ermittelt, die der Milchkuh in den Berechnungen ebenfalls unterstellt werden.

Tabelle 18: Energieintensität für die Futterbereitstellung [ $\text{MJ kg}^{-1}$  Milch] in Abhängigkeit von der Milchleistung und der Reproduktionsrate

Reproduktionsrate %	4.000 kg*	5.000 kg*	6.000 kg*	7.000 kg*	8.000 kg*	9.000 kg*	10.000 kg*
10	2,38	2,20	2,07	2,01	1,88	1,86	1,86
15	2,49	2,30	2,15	2,08	1,94	1,92	1,91
20	2,61	2,39	2,23	2,14	2,00	1,97	1,96
25	2,73	2,48	2,31	2,21	2,05	2,02	2,00
30	2,85	2,58	2,39	2,28	2,11	2,07	2,05
35	2,96	2,67	2,46	2,35	2,17	2,12	2,10
40	3,08	2,77	2,54	2,41	2,23	2,18	2,14
45	3,20	2,86	2,62	2,48	2,29	2,23	2,19
50	3,32	2,95	2,70	2,55	2,35	2,28	2,24

\* Milch Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup>



Die Berechnungen zeigen, dass sich die Energieintensität der Futterbereitstellung mit zunehmender Reproduktionsrate gleichmäßig erhöht. Ansteigende Milchleistungen bewirken dagegen die Abnahme der Energieintensität. Dieser Effekt verringert sich mit steigenden Milchleistungen. Besonders deutlich wird diese Verringerung ab einer Milchleistung von 8.000 kg. Eine weitere Steigerung der Milchleistung wirkt sich ab diesem Bereich nur noch geringfügig auf den kumulierten Energieaufwand aus. Der Vergleich der Energieintensität der Futterbereitstellung unter Betrachtung der unterschiedlichen Abstufungen von Reproduktionsrate und Milchleistungen zeigt deutlich, dass die Reproduktionsrate einen wesentlichen Einfluss auf die Energieintensität des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung ausübt. Beispielsweise ist die Energieintensität der Futterbereitstellung für die Produktion von einem kg Milch bei einer Milchleistung von 6.000 kg und einer Reproduktionsrate von 20 % genauso groß wie bei einer Milchleistung von 8.000 kg und einer Reproduktionsrate von 40 % beziehungsweise bei einer Milchleistung von 10.000 kg und einer Reproduktionsrate von 50 %.

Weitere Untersuchungen beziehen sich auf den Einfluss unterschiedlicher Milchleistungen und Reproduktionsraten auf die Energieintensität des vollständigen Standardverfahrens der Milchviehhaltung (Abbildung 24). Neben dem kumulierten Energieaufwand der Futterbereitstellung wird der Energieaufwand aller Verfahrensabschnitte berücksichtigt und an die einzelnen Milchleistungen angepasst. Die Berechnung des Energieaufwands für den Verfahrensabschnitt Milchgewinnung bezieht sich auf eine Energieintensität von 0,57 MJ pro kg Milch. Die Anpassung des Energieaufwands des Verfahrensabschnitts Maschinen erfolgt unter Berücksichtigung der Futterrationen der Tiere bei unterschiedlichen Milchleistungsklassen. Aus Abbildung 26 wird deutlich, dass mit zunehmender Reproduktionsrate die Energieintensität gleichmäßig ansteigt. Mit wachsender Milchleistung nimmt die Energieintensität ab. Die Reproduktionsrate übt dabei einen wesentlichen Einfluss auf die Energieintensität aus. Vergleicht man die Energieintensität bei einer Milchleistung von 8.000 kg Milch mit einer Reproduktionsrate von 30 % und die bei einer Milchleistung von 10.000 kg Milch mit einer Reproduktionsrate von 45 % mit der einer Milchleistung von 7.000 kg und einer Reproduktionsrate von 20 %, so ist festzustellen, dass deren Aufwand an Energie in etwa gleich ist.

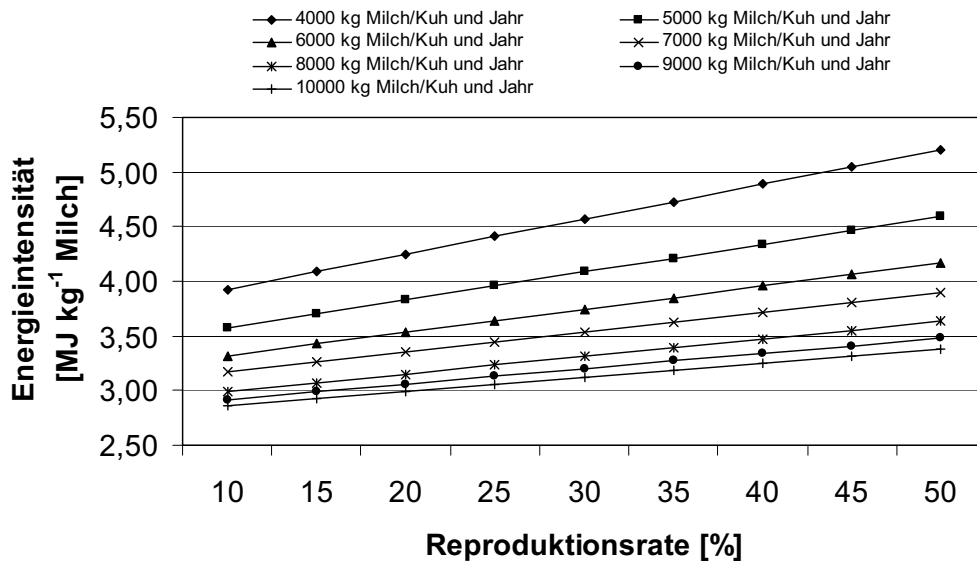


Abbildung 26: Energieintensität des Verfahrens Milchproduktion unter Einfluss verschiedener Milchleistungen und Reproduktionsraten

#### 4.4 Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse

Mithilfe der Sensitivitätsanalyse wird geprüft, welche Auswirkungen die Beeinflussung der einzelnen Verfahrensabschnitte auf den kumulierten Energieaufwand hat. Die bisher dargestellten Ergebnisse haben gezeigt, dass die Verfahrensabschnitte Futterbereitstellung, Nachzucht und Milchgewinnung die höchsten Anteile am kumulierten Energieaufwand haben (Abbildung 28).

Die Untersuchungen machen deutlich, dass der kumulierte Energieaufwand im Milchproduktionsverfahren in vielerlei Hinsicht beeinflussbar ist. Die vielen unterschiedlichen Energieinputs in das Verfahren ermöglichen eine vielseitige Steuerung der Energieeffizienz des Produktionsverfahrens.

Da die Kalkulation des kumulierten Energieaufwands der Milchviehhaltung von einer Reihe von Parametern abhängt, besteht ein gewisses Maß an Unsicherheiten. Im Folgenden sollen unterschiedliche Möglichkeiten zur Einschätzung eventueller Unsicherheiten und Abweichungen vorgestellt werden.

Die Berechnung der Unsicherheiten erfolgt nach Gleichung (30). Die Ergebnisse der Berechnung des kumulierten Energieaufwands sind im Abschnitt 4.1.6 zusammengefasst.

Zunächst werden in Form einer Fehlerfolgeabschätzung beispielhaft Unsicherheiten für die Verfahrensabschnitte Futterbereitstellung, Milchgewinnung und Nachzucht dargestellt, um den Einfluss dieser Unsicherheiten auf den kumulierten Energieaufwand zu

zeigen. Auch in den Verfahrensabschnitten Gebäude und bauliche Anlagen sowie Maschinen und technische Ausrüstung sind Unsicherheiten vorhanden. Jedoch werden diese aufgrund des geringen Anteils dieser Verfahrensabschnitte am kumulierten Energieaufwand nicht berücksichtigt.

#### *E<sub>F</sub> (R) - Futterbereitstellung*

Aufgrund der komplexen Datenbasis des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung sind Spielräume für Unsicherheiten vorhanden. Diese Unsicherheiten werden anhand der Gleichung (23) berechnet. Daher soll an dieser Stelle die Annahme getroffen werden, dass der durchschnittliche Energieaufwand pro kg Futtermittel der Standardration (Tabelle 24) um bis zu 10 % schwanken könnte. Der mittlere Energieaufwand der Futtermittel der Standardration beträgt 2,21 MJ kg TM. Mit einer angenommenen zehnprozentigen Abweichung würde der Energieaufwand zur Produktion von einem kg Futtermittel durchschnittlich um 0,22 MJ um den berechneten Mittelwert schwanken. Zur Fütterung der Milchkühe werden entsprechend der definierten Standardration 6.367 kg TM pro Kuh und Jahr unterstellt (Tabelle 24). Für die Berechnungen wird eine Unsicherheit von 5 % bezogen auf die eingesetzte Masse an Futtermitteln unterstellt.

$$\bar{X} = 2,21 \frac{\text{MJ}}{\text{kg Futter}} \quad u_x = \pm 0,22 \frac{\text{MJ}}{\text{kg Futter}}$$

$$\bar{Z} = 6.367 \frac{\text{kg Futter}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}} \quad u_z = \pm 318,35 \frac{\text{kg Futter}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}$$

$$u_{E_F(R)} = \pm \sqrt{\left(6.367 \frac{\text{kg Futter}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}} \cdot 0,22 \frac{\text{MJ}}{\text{kg Futter}}\right)^2 + \left(2,21 \frac{\text{MJ}}{\text{kg Futter}} \cdot 318,35 \frac{\text{kg Futter}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}\right)^2}$$

$$u_{E_F(R)} = \pm \sqrt{\left(1.400,74 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}\right)^2 + \left(703,55 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}\right)^2}$$

$$\underline{u_{E_F(R)} = \pm 1.568 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}}$$

Unter Nutzung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes wird deutlich, dass die Unsicherheit des Energieaufwands pro kg Futtermittel einflussreicher auf den kumulierten Energieaufwand für die Futterbereitstellung ist, als die Unsicherheit der benötigten Futtermittel-

menge. Insgesamt wurde unter den beschriebenen Bedingungen für den Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung eine Unsicherheit des kumulierten Energieaufwands von 1.568 MJ pro Kuh und Jahr ermittelt.

#### $E_N(RP)$ - Nachzucht

In dem Verfahrensabschnitt Nachzucht wird aufgrund der Vernachlässigung der Verfahrensabschnitte Maschinen und technische Ausrüstung sowie Gebäude und bauliche Anlagen nur die Unsicherheit der Futterbereitstellung berechnet. Der Energieaufwand des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung wird im Bereich Nachzucht ( $E_N(F)$ ) ebenfalls mit einer Unsicherheit für den "Energieaufwand pro kg Futter" als auch für die Futtermenge, das heißt "kg Futter pro Färse" bestimmt. Insgesamt erhält eine Färse in der für die Standardration definierten Aufzuchtdauer 4.347 kg Futtermittel, worin auch das Futter für die Zeit als Kalb enthalten ist. Die Berechnungen finden anhand der gleichen Vorgehensweise statt wie für den Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung der Milchkühe. Daraus ergibt sich folgende Berechnung anhand der Gleichung (26):

$$\bar{A} = 1,55 \frac{\text{MJ}}{\text{kg Futter}} \quad u_A = \pm 0,16 \frac{\text{MJ}}{\text{kg Futter}}$$

$$\bar{B} = 4.347 \frac{\text{kg Futter}}{\text{Färse}} \quad u_B = \pm 217,35 \frac{\text{kg Futter}}{\text{Färse}}$$

$$u_{E_N(F)} = \pm \sqrt{\left(4.347 \frac{\text{kg Futter}}{\text{Färse}} \cdot 0,16 \frac{\text{MJ}}{\text{kg Futter}}\right)^2 + \left(1,55 \frac{\text{MJ}}{\text{kg Futter}} \cdot 217,35 \frac{\text{kg Futter}}{\text{Färse}}\right)^2}$$

$$u_{E_N(F)} = \pm \sqrt{\left(695,52 \frac{\text{MJ}}{\text{Färse}}\right)^2 + \left(336,89 \frac{\text{MJ}}{\text{Färse}}\right)^2}$$

$$\underline{u_{E_N(F)} = \pm 773 \frac{\text{MJ}}{\text{Färse}}}$$

Der Energieaufwand für die Färse kann dem kumulierten Energieaufwand pro Kuh und Jahr nur anteilig in Abhängigkeit der Reproduktionsrate angelastet werden. Aufgrund der im Standardverfahren definierten Reproduktionsrate von 44 % wird der Kuh pro Jahr der Energieaufwand von 11 Monaten der Aufzuchtdauer der Färse angerechnet.

Daraus ergibt sich eine Unsicherheit des kumulierten Energieaufwands für die Futterbereitstellung der Färsen von

$$u_{E_{N(F)}} = \frac{\pm 773 \frac{\text{MJ}}{\text{Färsen}}}{25 \frac{\text{Aufzuchtmonate}}{\text{Färsen}}} \cdot 11 \frac{\text{Aufzuchtmonate}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}} = \pm (30,91 \cdot 11) \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}$$

$$u_{E_{N(F)}} = \pm 340 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}$$

Der ermittelte Wert schwankt demzufolge in Abhängigkeit steigender oder sinkender Reproduktionsraten.

#### *E<sub>P</sub> - Milchgewinnung*

Der Anteil des Verfahrensabschnitts Milchgewinnung am kumulierten Energieaufwand des Milchproduktionsverfahrens beträgt 16 % (Abbildung 24).

Im Verfahrensabschnitt Milchgewinnung werden mittels der Fehlerfolgerechnung beispielhaft Unsicherheiten des Energieaufwands in Abhängigkeit des Energieäquivalents "MJ pro kWh" sowie des Energieaufwands "kWh pro kg Milch" ermittelt. Für die Berechnungen wird das Energieäquivalent für die Herstellung der elektrischen Energie aus Steinkohle verwendet, welches 10,3 MJ pro kWh (GEMIS, 2006) beträgt. Als Unsicherheit wird nun unterstellt, dass die Elektroenergie ausschließlich aus einem anderen Energieträger, beispielsweise Erdgas, mit 9,7 MJ pro kWh (GEMIS, 2006) erzeugt werden könnte. Das würde einer Veränderung des Energieeinsatzes von 6 % pro kWh entsprechen. Diese Unsicherheiten werden anhand der Gleichung (29) berechnet.

Die Energieintensität der Milchgewinnung mit konventionellen Melksystemen, unter den in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Bedingungen, liegt im Schwankungsbereich von 0,51 und 0,64 MJ kg<sup>-1</sup> Milch. Demnach besteht eine Abweichung vom, mit 0,57 MJ kg<sup>-1</sup> Milch, bestimmten Mittelwert von ± 10 %. Als Unsicherheit für den Elektroenergieeinsatz des Melksystems ist eine Unsicherheit von 10 % pro kg Milch berücksichtigt. Als weitere Annahme erfolgt die Belastung der Milchleistung mit einer Unsicherheit von 5 %.

Der Einfluss des Melksystems auf den kumulierten Energieaufwand der Milchgewinnung ist verhältnismäßig groß. Bereits bei einer geringen Unsicherheit, hier an der Spannweite des Energieaufwands für konventionelle Melksysteme dargestellt, ist eine deutliche Beeinflussung des kumulierten Energieaufwands zu erkennen. Insgesamt ist

für den Bereich Milchgewinnung unter den beschriebenen Bedingungen eine Unsicherheit von 605 MJ pro Kuh und Jahr festzustellen.

$$\begin{aligned}\bar{H} &= 10,3 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}^{-1}} & u_H &= \pm 0,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}^{-1}} \\ \bar{Y} &= 0,055 \frac{\text{kWh}^{-1}}{\text{kg Milch}} & u_Y &= \pm 0,006 \frac{\text{kWh}^{-1}}{\text{kg Milch}} \\ \bar{V} &= 8.000 \frac{\text{kg Milch}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}} & u_V &= \pm 400 \frac{\text{kg Milch}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}\end{aligned}$$

$$u_{E_P} = \pm \sqrt{\left(0,055 \frac{\text{kWh}^{-1}}{\text{kg Milch}} \cdot 8.000 \frac{\text{kg Milch}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}} \cdot 0,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}^{-1}}\right)^2 + \left(10,3 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}^{-1}} \cdot 8.000 \frac{\text{kg Milch}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}} \cdot 0,006 \frac{\text{kWh}^{-1}}{\text{kg Milch}}\right)^2 + \left(10,3 \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}^{-1}} \cdot 0,055 \frac{\text{kWh}^{-1}}{\text{kg Milch}} \cdot 400 \frac{\text{kg Milch}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}\right)^2}$$

$$u_{E_P} = \pm \sqrt{\left(264 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}\right)^2 + \left(494,4 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}\right)^2 + \left(226,6 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}\right)^2}$$

$$\underline{u_{E_P} = \pm 605 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}}$$

*Zusammenfassung der betrachteten Unsicherheiten auf den kumulierten Energieaufwand des Standardverfahrens*

Unter Berücksichtigung der beispielhaft dargestellten Unsicherheiten wird folgende Unsicherheit für den kumulierten Energieaufwand pro Kuh und Jahr für das Standardverfahren gemäß Gleichung (30) ermittelt:

$$u_E = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta E}{\delta E_F(R)} \cdot u_{E_F(R)}\right)^2 + \left(\frac{\delta E}{\delta E_N(RP)} \cdot u_{E_N(RP)}\right)^2 + \left(\frac{\delta E}{\delta E_P} \cdot u_{E_P}\right)^2}$$

$$u_E = \pm \sqrt{\left(u_{E_F(R)}\right)^2 + \left(u_{E_N(RP)}\right)^2 + \left(u_{E_P}\right)^2}$$

$$u_E = \pm \sqrt{\left(1.567,5 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}\right)^2 + \left(340 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}\right)^2 + \left(605 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}\right)^2}$$

$$\underline{u_E = \pm 1.714 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}}$$

Der kumulierte Energieaufwand inklusive der ermittelten Unsicherheit berechnet sich wie folgt gemäß Gleichung (31):

$$E = (14.102 + 5.631 + 4.581 + 806 + 3.195) \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}} \pm 1.714 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}$$

$$\underline{E = 28.315 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}} \pm 1.714 \frac{\text{MJ}}{\text{Kuh} \cdot \text{Jahr}}}$$

Das bedeutet einen möglichen Anstieg des kumulierten Energieaufwands pro Kuh und Jahr auf 30.029 MJ bzw. auf eine Energieintensität von 3,75 MJ pro kg Milch. Ebenso könnte sich der kumulierte Energieaufwand auf 26.601 MJ pro Kuh und Jahr bzw. auf eine Energieintensität von 3,33 MJ pro kg Milch verringern. Insgesamt stellt sich ein Schwankungsbereich des kumulierten Energieaufwands von  $\pm 6 \%$  heraus. Den größten Anteil an der Veränderung hat in dieser Berechnung die Unsicherheit des Energieaufwands für die Bereitstellung der Futtermittel.

Zur weiteren Prüfung der Sensitivität des kumulierten Energieaufwands durch einzelne Einflüsse auf das Ergebnis erfolgen weitere Kalkulationen bezogen auf konkrete Energieinputs.

#### *Energieaufwand zur Herstellung von Stickstoffmineraldünger*

Einer der einflussreichen Parameter auf den kumulierten Energieaufwand ist die Mineraldüngung, welche einen Anteil von 21 % am kumulierten Energieaufwand hat. Dabei ist der energieaufwändige Vorgang der Stickstoffdüngerherstellung besonders zu beachten. Der Energieaufwand für den eingesetzten Stickstoffdünger beträgt ca. 52 % des Energieaufwands für Mineraldünger. In den bisherigen Kalkulationen wird für Stickstoffdünger ein Energieaufwand in Höhe von  $35,3 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ N}$  (APPL, 1997) in die Berechnungen einbezogen. Dieser Wert ordnet sich im Vergleich zu anderen Literaturangaben im unteren Bereich ein und spiegelt den Energieaufwand in modernen Produktionsanlagen wider.

Die weiteren Untersuchungen beziehen sich unter Berücksichtigung der Abschreibungszeit der Produktionsanlagen auf die Literaturangaben zum Energieaufwand zur Herstellung von Mineraldünger der letzten 20 Jahre. Die Daten aus der Literatur schwanken zwischen  $55,5 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ N}$  (HAAS ET AL., 1995),  $49,1 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ N}$  (PATYK & REINHARDT, 1997),  $43,08 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ N}$  (BIERMANN ET AL., 1999),  $39,6 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ N}$  (UHLIN, 1999),  $38 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ N}$  (REFSGAARD ET AL., 1998),  $37,5 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ N}$  (EFMA, 2000) und

35,3 MJ kg<sup>-1</sup> N (APPL, 1997). Diese Schwankungsbreite bietet Anlass dazu anzunehmen, dass der Energieaufwand zur Herstellung des Mineraldüngers auch höher sein könnte als der bisher angewandte Wert. Bildet man den Mittelwert der bereits genannten Energieäquivalente für Mineraldünger, so erhält man einen durchschnittlichen Energieaufwand zur Herstellung des Mineraldüngers von 42,6 MJ kg<sup>-1</sup> N.

Auf der anderen Seite ist eine stetige Abnahme des Energieaufwands zur Herstellung des Stickstoffdüngers zu beobachten (Abbildung 27). Moderne Produktionsanlagen ermöglichen drastische Energieeinsparungen (APPL, 1997). So sank der Energieaufwand zur Herstellung des Stickstoffdüngers durchschnittlich um 3,5 % pro Jahr (von 1956 bis 1997). Da momentan nicht von einer weiteren derartig entscheidenden Abnahme des Energieaufwands zur Herstellung des Stickstoffdüngers ausgegangen werden kann, wird im Folgenden eine jährliche Verringerung des Energieaufwands von 1 % unterstellt. Danach würde der Energieaufwand zur Herstellung des Stickstoffdüngers 30,9 MJ kg<sup>-1</sup> N im Jahr 2010 betragen.

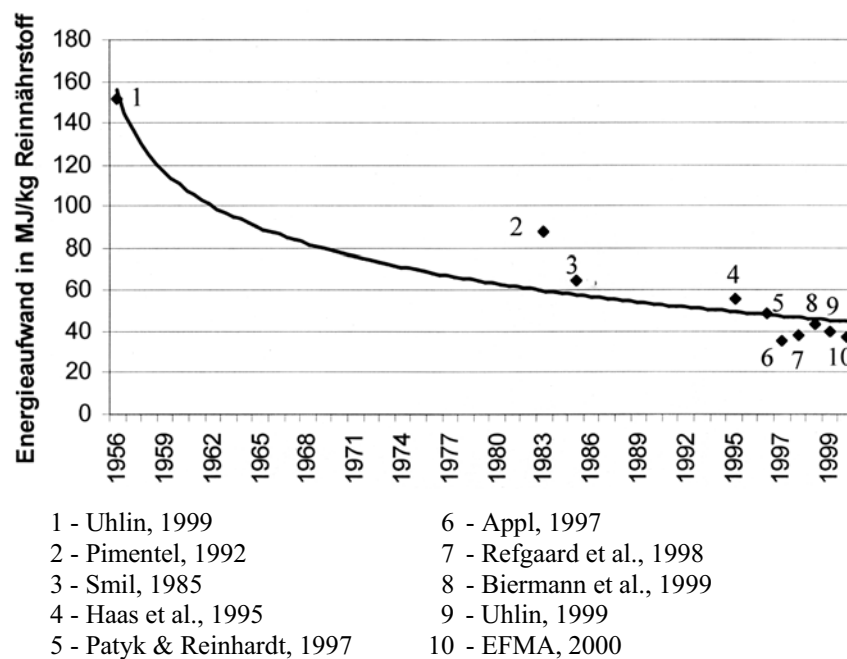


Abbildung 27: Energieaufwand für die Herstellung von Stickstoffdünger

Der Einfluss der Stickstoffdüngung ist mit einer Erhöhung von 2,26 % beziehungsweise einer Abnahme von 1,41 % des kumulierten Energieaufwands bedeutend.

#### *Energieaufwand zur Herstellung von Zukauffuttermitteln*

Als weiterer starker Einflussfaktor auf den kumulierten Energieaufwand ist aus dem Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung der Parameter Zukauffuttermittel zu nennen.



Die Bereitstellung der Zukauffuttermittel hat einen Anteil von 26 % am kumulierten Energieaufwand. Eine Reduzierung des Energieaufwands für die Herstellung der Rationsbestandteile entsprechend den Kalkulationen von KIM UND DALE (2004) und ZHU (2005) zum Sojaextraktionsschrot auf  $2 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ TM}$  und eigenen Berechnungen zum Energieaufwand von Rapsextraktionsschrot auf  $4 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ TM}$  deutet insgesamt auf eine realistische Reduzierung des Energieaufwands für die Zukauffuttermittel um 10 % hin. Die Verminderung des Energieeinsatzes für die Zukauffuttermittel zeigt einen großen Einfluss am kumulierten Energieaufwand der Futterbereitstellung. Die Reduzierung des Energieaufwands für die Bereitstellung der Zukauffuttermittel um 10 % bedeutet eine Senkung des kumulierten Energieaufwandes des Standardverfahrens um 2,54 %.

#### *Energieaufwand zur Herstellung und zum Betriebsmitteleinsatz von Maschinen im Pflanzenbau*

Mit jeweils 6 % üben die Parameter Maschinen und Dieselkraftstoff für den Pflanzenbau Einfluss auf den kumulierten Energieaufwand aus. Unter der Annahme, dass aufgrund der weiteren technischen Entwicklung der Einsatz von Dieselkraftstoff als auch die Einsatzzeit der Maschinen um jeweils 10 % geringer wird, ergibt sich eine Verringerung des kumulierten Energieaufwandes des Standardverfahrens von 1,41 %.

#### *Energieaufwand zur Herstellung und zum Betriebsmitteleinsatz der Maschinen und Gebäude in der Tierhaltung*

Zum Verfahrensabschnitt Maschinen und technische Ausrüstung gehört auch der dazugehörige Energieaufwand für Dieselkraftstoff (5 %) in der Tierhaltung und nimmt somit insgesamt einen Anteil von 11 % (Abbildung 24) am kumulierten Energieaufwand des Verfahrens ein. Unter der Annahme, dass auch hier der Energieeinsatz für die Maschinen als auch der Kraftstoffverbrauch jeweils um 10 % effizienter wird, ist eine Abnahme des kumulierten Energieaufwands des Standardverfahrens um 1,41 % zu verzeichnen. Die Verringerung des Energieaufwands zur Herstellung der Maschinen um 10 % bewirkt eine Reduzierung des kumulierten Energieaufwands des Standardverfahrens um 0,85 %.

Der Anteil der Gebäude und baulichen Anlagen am kumulierten Energieaufwand des Verfahrens ist mit 3 % gering. Eine Senkung des Energieaufwands zur Herstellung der Gebäude um 10 % bewirkt eine Senkung des kumulierten Energieaufwands des Standardverfahrens um 0,56 %.

### *Zusammenfassung der Sensitivitätsanalyse*

Die Berechnungen haben deutlich gezeigt, dass der kumulierte Energieaufwand bereits durch Änderungen einzelner Parameter beeinflussbar ist. Tabelle 19 zeigt welchen Einfluss einzelne Änderungen auf den kumulierten Energieaufwand haben.

Tabelle 19: Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens in Abhängigkeit spezieller Änderungen in den einzelnen Verfahrensabschnitten

<b>Maßnahme</b>	<b>Veränderung der Berechnung zum Originalwert</b>	<b>Energieintensität</b>	<b>bewirkte Veränderung zur Energieintensität des Standardverfahrens</b>	<b>Veränderung der Energieintensität</b>
	<b>[%]</b>	<b>[MJ kg<sup>-1</sup> Milch]</b>	<b>[%]</b>	<b>[MJ kg<sup>-1</sup> Milch]</b>
Stickstoffdüngung	+20,6	3,62	+2,26	+0,08
Stickstoffdüngung	-13	3,49	-1,41	-0,05
P-Herstellung Maschinen	-10	3,51	-0,85	-0,03
P-Maschinen und Dieselkraftstoffeinsatz	-10	3,49	-1,41	-0,05
Zukauffuttermittel	-10	3,45	-2,54	-0,09
T-Herstellung Maschinen und technische Ausrüstung	-10	3,51	-0,85	-0,03
T-Herstellung Maschinen und Dieselkraftstoffeinsatz	-10	3,49	-1,41	-0,05
Gebäude	-10	3,52	-0,56	-0,02

T - Tierhaltung P - Pflanzenbau

Die weitere Effizienzsteigerung bei der Düngemittelherstellung wirkt sich positiv auf den kumulierten Energieaufwand des Standardverfahrens aus, jedoch nur in einem sehr geringen Umfang. Insgesamt gibt der Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung die größten Einflussmöglichkeiten auf den kumulierten Energieaufwand. Bezogen auf das Gesamtverfahren ist auch der Maschineneinsatz mit dem dazugehörigen Dieselverbrauch eine sinnvoll nutzbare Größe zur Effizienzsteigerung im Verfahren.

Die Kombination aller vorgestellten reduzierenden Faktoren bewirkt eine Reduzierung des kumulierten Energieaufwands um 10,5 % und führt zu einer Energieintensität von 3,17 MJ kg<sup>-1</sup> Milch.

#### 4.5 Energieintensität im Milchproduktionsverfahren in Abhängigkeit von Verfahrensvarianten

Die Kalkulationen zu den verschiedenen Verfahrensabschnitten des Milchproduktionsverfahrens zeigen Möglichkeiten zur positiven als auch zur negativen Beeinflussung des kumulierten Energieaufwands. In Tabelle 20 ist der kumulierte Energieaufwand in Abhängigkeit der Ertragsklassen und der kalkulierten Futterration entsprechend den im Standardverfahren definierten Rahmenbedingungen dargestellt. Ein Rationsbestandteil ist in den Futterrationen jeweils maximiert. Dementsprechend unterscheidet sich der Energieaufwand für die Maschinen zur Fütterung und Entmistung.

Tabelle 20: Energieintensität für das Milchproduktionsverfahren in Abhängigkeit verschiedener Futterrationen und Haltungsbedingungen

Futter- ration Nr.	Bezeichnung	Ertrags- klasse 1	Ertrags- klasse 2	Ertrags- klasse 3	Ertrags- klasse 4
		Energieintensität [MJ kg <sup>-1</sup> Milch]			
1	Standard mit Halbtagsweide	3,60	3,54	3,45	3,55
2	Kraft-/Ausgleichsfutter mit Halbtagsweide	3,97	3,91	3,88	3,96
3	Grassilage mit Halbtagsweide	3,72	3,51	3,47	3,55
4	Maissilage mit Halbtagsweide	3,57	3,52	3,50	3,61
5	Standard ohne Weide	4,13	4,03	4,01	4,03
6	Kraft-/Ausgleichsfutter ohne Weide	4,35	4,28	4,27	4,33
7	Grassilage ohne Weide	4,27	4,07	4,00	4,07
8	Maissilage ohne Weide	3,99	3,92	3,92	4,08
9	Standard mit Ganztagsweide	3,37	3,29	3,23	3,33
10	Grassilage mit Ganztagsweide	3,34	3,22	3,14	3,25
11	Maissilage mit Ganztagsweide	3,32	3,26	3,21	3,32

Ein Optimum der Energieintensität ist bei den Ertragsklassen 2 und 3 zu erkennen, wobei sich Ertragsklasse 3 im direkten Vergleich als die Ertragsklasse mit der geringsten Energieintensität zeigt. Die Ertragsklassen 1 und 4 sind nahezu identisch.

Auffällig ist weiterhin die wachsende Differenz der Energieintensität zwischen den unterschiedlichen Futterrationen. Die Energieintensität nimmt mit zunehmendem Anteil an Weidefutter in der Ration ab. Verursacht wird diese Abnahme der Energieintensität durch den geringen Energieaufwand zur Bereitstellung von Weidefutter, aber auch durch den geringeren Maschineneinsatz zur Fütterung sowie zur Entmistung der Tiere im Stall.

Die Energieintensität der Varianten mit ganzjähriger Stallhaltung ist bis zu 15 % höher als die Varianten mit Halbtagsweide und sogar bis zu 32 % höher als die Varianten mit

Ganztagsweide. Beim Vergleich der Rationen mit dem jeweils gleichen maximierten Rationsbestandteil ist zwischen den Rationen mit Grassilage (3, 7 und 10) die höchste Differenz zu erkennen.

Im Folgenden werden zwei Varianten zur Energieintensität im Milchproduktionsverfahren betrachtet, die das Maximum sowie das Minimum des Energieaufwands in Abhängigkeit der durchgeführten Berechnungen darstellen. Hierbei wird deutlich, welchen Einfluss Entscheidungen zur Art und Weise der Produktion haben (Tabelle 21).

Die erste Variante spiegelt dabei ein energieintensives Verfahren wider. Im Gegensatz zum Standardverfahren (Abschnitt 4.1) wird eine ganzjährige Stallhaltung der Milchkühe sowie der Jungrinder vorausgesetzt. Weiterhin wird für die Kalkulation der Energieaufwand zur Futterbereitstellung der Ration 6 mit Futtermitteln der Ertragsklasse 2 unterstellt (Abbildung 9). Die Milchgewinnung erfolgt mit einem automatischen Melksystem. Die Reproduktionsrate beträgt 50 %. Die Energieintensität für Variante 1 beträgt  $4,49 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch und ist somit um 27 % höher als die Energieintensität des Standardverfahrens ( $3,54 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch).

Tabelle 21: Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens in Abhängigkeit von Verfahrensänderungen am Beispiel der Variante 1 (maximierte Energieintensität) und Variante 2 (reduzierte Energieintensität)

Verfahrensabschnitt	Standard	Variante 1	Variante 2
	Energieintensität [ $\text{MJ kg}^{-1}$ Milch]		
Futterbereitstellung	1,76	2,21	1,55
Nachzucht	0,70	1,01	0,56
Milchgewinnung	0,57	0,66	0,57
Maschinen und technische Ausrüstung	0,40	0,50	0,29
Gebäude	0,10	0,10	0,10
<b>Summe</b>	<b>3,54</b>	<b>4,49</b>	<b>3,08</b>

Variante 2 zeigt, wie der Energieaufwand im Produktionsverfahren reduziert werden kann. Hierbei wird Ration 10 mit Ganztagsweide unterstellt, wobei die Futtermittel ebenfalls in der Ertragsklasse 2 produziert werden (Abbildung 9). Es wird das gleiche konventionelle Melksystem, der Fischgrätenmelkstand, zur Milchgewinnung eingesetzt wie im Standardverfahren und auch die Jungrinder werden im Sommer ganztägig auf der Weide gehalten (Tabelle A8). Die Reproduktionsrate ist niedriger als im Standardverfahren und beträgt 35 %. Unter diesen Bedingungen beträgt die Energieintensität

3,08 MJ kg<sup>-1</sup> Milch und ist somit um 13 % geringer als die Energieintensität des Standardverfahrens.

Die Beispielrechnungen zeigen, dass es möglich ist, durch Entscheidungen des Betriebsmanagements starke Änderungen der Energieintensität zu erzielen. So besteht anhand der dargestellten Variante 1 die Möglichkeit den Energieaufwand um knapp ein Drittel zu erhöhen. Die Möglichkeit der Reduzierung des Energieaufwands ist wie in Variante 2 dargestellt mit einem Achtel vergleichsweise gering.

Deutlich zu erkennen ist der starke Einfluss der Bereiche Futterbereitstellung, Reproduktionsrate sowie des Haltungssystems mit Weidehaltung oder ohne Weidehaltung auf die Energieintensität. Allein im Bereich der Futterbereitstellung besteht in diesen Beispielen eine Schwankungsbreite von 0,66 MJ kg<sup>-1</sup> Milch. Im direkten Zusammenhang dazu steht der Einsatz der Maschinen in der Tierhaltung. Dafür ist eine Schwankungsbreite von 0,21 MJ kg<sup>-1</sup> Milch gegeben. Der Einfluss der Reproduktionsrate sowie der Haltung der Jungrinder ist mit einer Schwankungsbreite der Energieintensität von 0,45 MJ kg<sup>-1</sup> Milch ebenfalls beachtlich. Die Wahl zwischen konventionellem und automatischem Melksystem hat keinen entscheidenden Einfluss auf die Energieintensität, wobei dennoch zu beachten ist, dass der Energieaufwand für das automatische Melksystem etwas höher ist.

Die Wahl des Entmistungssystems stellt sich als vernachlässigbar heraus. Da der höhere Energieaufwand der Gebäude mit Spaltenboden eines Flüssigmistverfahrens durch den höheren Energieaufwand der Maschinen für die Entmistung im Festmistverfahren kompensiert wird.

#### **4.6 Allokation des kumulierten Energieaufwandes des Standardverfahrens**

##### **4.6.1 1. Methode: Vermeidung der Allokation**

Die Allokation des kumulierten Energieaufwandes auf die verschiedenen Produkte im Verfahren wird in dieser Methode nicht vorgenommen. Der kumulierte Energieaufwand wird dem Zielprodukt Milch angelastet. Diese Vorgehensweise ist aus ökonomischer Sicht begründet, da die Produktion der Milch der Grund für die Existenz des Verfahrens ist. Somit beträgt die Energieintensität für die Produktion von einem kg Milch 3,54 MJ. Abbildung 28 zeigt den Anteil der einzelnen Verfahrensabschnitte am kumulierten Energieaufwand des gesamten Produktionsverfahrens.

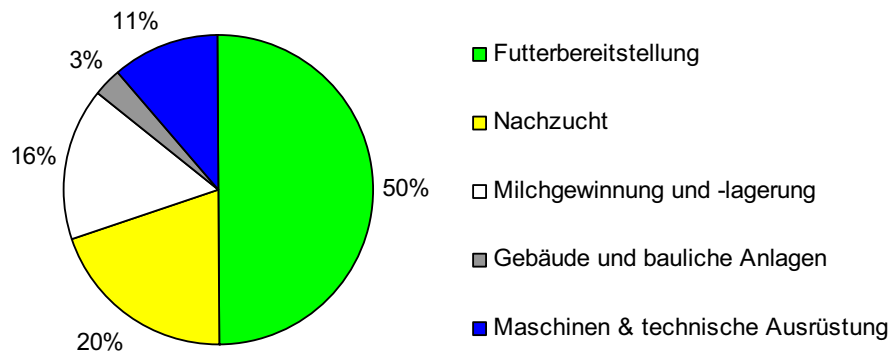


Abbildung 28: Kumulierter Energieaufwand der einzelnen Verfahrensabschnitte bezogen auf die erzeugte Milch im Standardverfahren [ $\Sigma 28.315 \text{ MJ Kuh}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ ]

Die Hälfte des kumulierten Energieaufwandes wird im Bereich der Futterbereitstellung eingesetzt. 20 % des kumulierten Energieaufwandes wird für die Bestandsergänzung im Betrieb benötigt und 16 % für die Milchgewinnung und Milchlagerung. Der Energieaufwand für Gebäude und bauliche Anlagen beträgt 6 % sowie für Maschinen und technische Ausrüstung 11 %.

#### 4.6.2 2. Methode: Allokation anhand biologisch-physiologischer Beziehungen im Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung

*1. Schritt: Allokation des Energieaufwandes des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung auf das Zielprodukt, die Kuppelprodukte, Fortwärme und Methan aus der Verdauung*

Als Ausgangsbasis der Berechnungen dient der Futterenergieeinsatz der in der Futterration enthaltenen Futtermittel. Tabelle 22 gibt einen Überblick über die berechneten Energiegehalte der einzelnen Futtermittel der definierten Standardration. In Tabelle 23 ist die Energieausnutzung der Futtermittel in Beziehung zu den verschiedenen Umsetzungsstufen verdauliche Energie, umsetzbare Energie bis zur Nettoenergie dargestellt.

Tabelle 22: Energiegehalt der Futtermittel

<b>Futtermittel</b>	<b>Bruttoenergie (GE)</b>	<b>Verdauliche Energie (DE)</b>	<b>Umsetzbare Energie (ME)</b>	<b>Nettoenergie (NE)</b>
Grassilage	18,09	13,02	10,20	6,10
Maissilage	18,44	13,27	10,60	6,40
Weide	18,42	14,18	10,60	6,40
Heu	18,21	11,83	9,10	5,30
Pressschnitzelsilage	17,75	15,27	11,90	7,40
Sojaextraktionsschrot	20,10	18,29	13,70	8,60
Rapsextraktionsschrot 00	19,83	15,86	11,80	7,20
Milchleistungsfutter	18,68	15,50	10,80	6,70
Triticale	18,52	16,48	13,10	8,30

Tabelle 23: Futterenergienutzung

<b>Futtermittel</b>	<b>Futterenergienutzung für verdauliche Ener- gie (DE) in %</b>	<b>Futterenergienut- zung für umsetzbare Energie (ME) in %</b>	<b>Futterenergienut- zung für Netto- energie (NE) in %</b>
Grassilage	72,00	56,39	33,72
Maissilage	72,00	57,49	34,71
Weide	77,00	57,55	34,75
Heu	65,00	49,98	29,11
Pressschnitzelsilage	86,00	67,03	41,68
Sojaextraktionsschrot	91,00	68,16	42,79
Rapsextraktionsschrot 00	80,00	59,50	36,31
Milchleistungs-futter	83,00	57,83	35,88
Triticale	89,00	70,75	44,82

Die Berechnung zu den Futtermitteln der Standardration zeigen, dass als Nettoenergie nur durchschnittlich 40 % der im Futtermittel enthaltenen Energie zur Verfügung stehen. Die anderen 60 % des Energiegehalts werden in Form von Exkrementen, Wärme und Methan aus der Verdauung dem weiteren Produktionskreislauf entzogen.

Der kumulierte Energieaufwand für die Futterbereitstellung wird aus dem Energieaufwand für die Herstellung der einzelnen Rationsbestandteile ermittelt. Tabelle 24 gibt einen Überblick über die Anteile der Futtermittel in der Standardration sowie den Energieaufwand zur Futterbereitstellung an.

Tabelle 24: Kumulierter Energieaufwand der Futterbereitstellung

Futtermittel	Anteile an der Standardration	Einsatz kg TM Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> Standardration	Energieintensität Herstellung MJ kg <sup>-1</sup> TM	Energieeinsatz für Futterbereitstellung MJ	Kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung MJ
Grassilage	27 %	1737	1,99	3452	14102
Maissilage	22 %	1428	1,66	2369	
Weide	19 %	1212	0,84	1018	
Heu	1 %	46	1,45	67	
Pressschnitzelsilage	4 %	231	3,89	899	
Sojaextraktionsschrot	2 %	103	4,25	438	
Rapsextraktionsschrot 00	5 %	295	5,26	1553	
Milchleistungsfutter	14 %	888	3,58	3179	
Triticale	7 %	427	2,64	1127	

Auf der Grundlage der Einteilung der Futterenergienutzung bis hin zur Nettoenergie erfolgt die Aufteilung des kumulierten Energieaufwandes auf die Produkte Milch, Schlachtkuh und Kalb als auch für die Fortwärme und zusammengefasst für die Exkreme und das Methan aus der Verdauung. Demnach werden für die Produktion von Milch, Schlachtkuh und Kalb durchschnittlich 36 % des kumulierten Energieaufwands und für die Fortwärme, die Exkreme und das Methan aus der Verdauung 64 % aufgewendet (Tabelle 25).

Tabelle 25: Kumulierter Energieaufwand für Ziel- und Kuppelprodukte, die Fortwärme und das Methan aus der Verdauung [MJ Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup>]

Aufteilung der Gruppen	%	Kumulierter Energieaufwand MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>
Milch, Schlachtkuh und Kalb	36	5.131
Fortwärme	23	3.258
Exkreme und Methan aus der Verdauung	41	5.713

## 2. Schritt: Allokation des Energieaufwandes der Nettoenergie

Die Allokation des Futterenergieeinsatzes auf die drei Produkte ergibt, dass 63 % der eingesetzten Nettoenergie auf das Zielprodukt Milch entfallen und 33 % für die Schlachtkuh notwendig sind. Berücksichtigt wird hierbei, dass für die Produktion von einem kg Milch der Kuh 3,3 MJ NEL und für den Erhaltungsbedarf einer Kuh mit einer Masse von 650 kg 37,7 MJ NEL pro Tag zugeführt werden müssen. Für das Kalb wird



ein zusätzlicher Energieaufwand für eine durchschnittliche Produktion von 8 kg Milch pro trockenstehender Kuh und Tag für das letzte Laktationsdrittel berechnet. Das Kalb hat mit 4 % nur einen sehr geringen Anteil am gesamten Energieaufwand der Fütterung. Der kumulierte Energieaufwand zur Futterbereitstellung wird adäquat zur Einteilung des Futterenergieaufwands auf die drei Produkte aufgeteilt (Tabelle 26).

Tabelle 26: Allokation des Energieaufwandes im Bereich Leistung

Aufteilung der Leistung	MJ NEL Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	%	Kumulierter Energieaufwand MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>
Milch	26.400	63	3.238
Schlachtkuh	13.761	33	1.683
Kalb	1.790	4	210
<b>Σ Energieaufwand</b>	<b>41.951</b>	<b>100</b>	<b>5.131</b>

### 3. Schritt: Ermittlung des Energieaufwands für die Exkreme

Der Anteil der Energie, welcher durch die Exkreme vom Tier ausgeschieden wird, kann im Produktionskreislauf weiter verwendet werden. Zum einen können die Exkreme als Wirtschaftsdünger wieder im Pflanzenbau eingesetzt werden und zum anderen können sie zur Biogasgewinnung genutzt werden. Es kann ebenso eine Kombination aus beidem erfolgen, indem die Gärreste als Dünger auf dem Feld eingesetzt werden.

Es wurden Kalkulationen durchgeführt, die den Energieaufwand zur Herstellung der Düngestoffe Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) aus Wirtschaftsdünger betrachten. Tabelle 27 gibt einen Überblick über die Ermittlung des für die Exkreme anrechenbaren Energieanteils.

Der kumulierte Energieaufwand für die Exkreme, anteilig gemessen an dem Futterenergieeinsatz, beträgt demnach 3.028 MJ pro Kuh und Jahr. Jedoch gehört zur Gülle auch anteilig der Energieaufwand zur Bildung des Urins der Tiere dazu, welcher sich in den Kalkulationen nicht einwandfrei von dem der entstehenden Gase trennen lässt. In Anlehnung an die Berechnungen von MILLS ET AL. (2001) wird ein Anteil von 6 % der Bruttoenergie für die Methanbildung angesetzt. Für die Berechnungen wurde ein Energieaufwand von 846 MJ für die Bildung von Methan berücksichtigt. Demnach wird für die Produktion der Gülle ein Energieaufwand von 4.867 MJ pro Kuh und Jahr berechnet.

Tabelle 27: Ermittlung des kumulierten Energieaufwands für die Exkreme

	<b>Maß- einheit</b>	<b>MJ Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup></b>
Σ kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung	MJ	14.102
kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung für Milch, Schlachtkuh und Kalb	MJ	5.131
kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung für Exkreme, Methan aus der Verdauung und Fortwärme	MJ	8.970
kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung für Fortwärme	MJ	3.258
kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung für Exkreme & Methan aus der Verdauung (GE, DE bis UE)	MJ	5.713
kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung für Methan aus der Verdauung	MJ	846
kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung für Urin	MJ	1.839
kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung für Exkreme (GE bis DE)	MJ	3.028

Darauf aufbauend wurde die Energieintensität ermittelt, die auf diese Art und Weise zur Produktion von jeweils einem der erzeugten Düngestoffe aufgewendet wird (Tabelle 28). Da dem Stickstoff in der Düngung eine entscheidende Bedeutung zukommt, soll hier auf das maximale Energieäquivalent von 61 MJ pro kg hingewiesen werden, welches sich auf einen Gehalt von 4 kg N pro m<sup>3</sup> Gülle (KTBL, 2006) bezieht und auftritt, wenn alle weiteren nutzbaren Stoffe in der Gülle energetisch ohne Bewertung bleiben.

Tabelle 28: Energieintensität zur Bereitstellung der jeweiligen Inhaltsstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) aus Wirtschaftsdünger

<b>Inhaltsstoffe</b>	<b>kg m<sup>-3</sup> Gülle</b>	<b>kg Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup></b>	<b>Energieintensität MJ kg<sup>-1</sup></b>
N	4	80	61
P	1,5	30	162
K	6	120	41

Weitere Kalkulationen befassen sich mit der detaillierteren Aufteilung des Energieaufwands der Exkreme auf die drei typischen Düngestoffe N, P und K. Diese Berechnungen dienen dazu ein Energieäquivalent für den Wirtschaftsdünger zu ermitteln. Hierbei werden die einzelnen Anteile der Düngestoffe pro m<sup>3</sup> Gülle als Bezugsbasis gewählt (Tabelle 29). Die Allokation des gesamten Energieaufwandes für die Exkrementbildung auf die 3 Hauptinhaltsstoffe ergibt ein durchschnittliches Energieäquivalent von 21 MJ pro kg Nährstoff.

Tabelle 29: Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung der im Wirtschaftsdünger enthaltenen Nährstoffe

Inhaltsstoffe	kg m <sup>-3</sup> Gülle	kg Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	% der berücksichtigten Inhaltsstoffe in der Gülle	KEA* MJ Kuh <sup>-1</sup> und Jahr <sup>-1</sup>	Energieintensität MJ kg <sup>-1</sup>
N	4	80	35	1.693	21
P	1,5	30	13	635	21
K	6	120	52	2.539	21

\* kumulierter Energieaufwand

Ein Vergleich des Energieaufwandes der Herstellung der Düngestoffe N, P und K zwischen Wirtschaftsdünger und Mineraldünger wird mithilfe von Energieäquivalenten für Mineraldünger durchgeführt (Tabelle 30). Um einen äquivalenten Düngewert zu dem in Tabelle 29 beschriebenen in Form von Mineraldünger zur Verfügung zu stellen, bedürfte es einen um etwa 8 % höheren Energieaufwand von insgesamt 5.252 MJ.

Tabelle 30: Kumulierter Energieaufwand für Mineraldünger

Düngestoff	N	P	K	Σ
kg	80	30	120	
Energieäquivalent für die Herstellung von Mineraldünger MJ kg <sup>-1</sup>	35,31 <sup>a</sup>	36,25 <sup>b</sup>	11,16 <sup>c</sup>	
kumulierter Energieaufwand MJ	2.825	1.088	1.339	5.252

<sup>a</sup> APPL, 1997

<sup>b</sup> KALTSCHMITT & REINHARDT, 1997

<sup>c</sup> HÜLSBERGEN, 2003

Die Exkreme haben einen bedeutenden Anteil am kumulierten Energieaufwand in der Milchviehhaltung. Besondere Bedeutung ist hierbei der leistungsgerechten Fütterung der Tiere anzurechnen. Exemplarisch wurde der Energieaufwand von verschiedenen Rindergüllen bewertet, um auch auf Extreme hinzuweisen, die durch eine entweder optimale Futterverwertung entstehen können beziehungsweise die durch eine starke Überversorgung der Tiere und eine sehr schlechte Futterverwertung auftreten (Tabelle 31). Bei einer Überversorgung der Tiere (vgl. Rindergülle 4) ist deutlich ein sehr hoher Energieaufwand im Produktionsverfahren zu erkennen.

Die Exkreme können weiterhin zur Produktion von Biogas eingesetzt werden. Pro m<sup>3</sup> Gülle beziehen sich die Berechnungen auf eine Biogasausbeute von 27 m<sup>3</sup> und einer Energieumwandlung von 21,6 MJ pro m<sup>3</sup> (QUELLE 4). Die Kalkulationen ergeben bei einem Anfall von 20 m<sup>3</sup> Gülle pro Kuh und Jahr eine Biogasausbeute von 540 m<sup>3</sup> pro Kuh und Jahr. Das entspricht einer Energieausbeute von 11.664 MJ.

Bei der weiteren Verwendung der Gärreste aus der Biogasanlage auf dem Acker als Düngemittel wird mit Einbeziehung des energetischen Wertes der Gülle 1 als Wirtschaftsdünger (Tabelle 31) ein Energieoutput von 16.302 MJ für die Exkreme pro Kuh und Jahr berechnet.

Tabelle 31: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Rindergüllen mit extremen Nährstoffgehalten berechnet mit Energieäquivalent für Mineraldünger

	Energieäquivalent [MJ kg <sup>-1</sup> ]	KTBL 2006/07	www.kali-gmbh.com		
Rindergülle		1	2	3	4
kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> m <sup>-3</sup>	15,8 <sup>b</sup>	1,5	0,07	1	2,76
kg K <sub>2</sub> O m <sup>-3</sup>	11,2 <sup>c</sup>	6	0,68	5	8,99
kg N m <sup>-3</sup>	35,3 <sup>a</sup>	4	1	4	6
m <sup>3</sup> Gülle Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>		20	20	20	20
Σ kumulierter Energieaufwand MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>		4.638	725	4.277	7.088

<sup>a</sup> APPL, 1997

<sup>b</sup> KALTSCHMITT & REINHARDT, 1997

<sup>c</sup> HÜLSBERGEN, 2003

#### 4.6.3 3. Methode: Allokation des kumulierten Energieaufwands des gesamten Verfahrens Milchproduktion auf die Produkte

Der kumulierte Energieaufwand pro Kuh und Jahr setzt sich aus dem Energieaufwand der einzelnen Verfahrensabschnitte Futterbereitstellung, Milchgewinnung, Nachzucht, Gebäude und bauliche Anlagen sowie Maschinen und technische Ausrüstung zusammen. Tabelle 32 gibt einen Überblick über die gesamten Energieinputs im Milchproduktionsverfahren.

Tabelle 32: Kumulierter Energieaufwand Standardverfahren

Verfahrensabschnitt	Kumulierter Energieaufwand MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>
Futterbereitstellung	14.102
Nachzucht	5.630
Milchgewinnung und -lagerung	4.581
Gebäude und bauliche Anlagen	806
Maschinen und technische Ausrüstung	3.195
<b>Gesamt</b>	<b>28.315</b>

Die Allokation des Energieaufwands erfolgt unter 5 verschiedenen methodischen Vorgehensweisen.

*Variante 0* bezieht sich bei der Allokation des kumulierten Energieaufwands auf das Zielprodukt Milch und auf das Kuppelprodukt Exkremente. Die Zuteilung des kumulierten Energieaufwands auf die Exkremente erfolgt unter Anwendung der Energieäquivalente für Mineraldünger. Für die Exkremente wird somit ein Energieaufwand von 5.252 MJ pro Kuh und Jahr in die Berechnungen einbezogen (Tabelle 30). Daraus ergibt sich ein Anteil am kumulierten Energieaufwand von 18,55 %. Dem Zielprodukt Milch werden 81,45 % des kumulierten Energieaufwands angelastet.

In *Variante 1* wird der kumulierte Energieaufwand auf die drei Produkte Milch, Schlachtkuh und Kalb zugeordnet. Die Ergebnisse der ersten Variante sind in Tabelle 33 dargestellt. Der Energieaufwand für die Futterbereitstellung zur Bildung von Fortwärme, Exkrementen und dem Methan aus der Verdauung wird entsprechend den Anteilen der Produkte Milch (63 %), Schlachtkuh (33 %) und Kalb (4 %) am kumulierten Energieaufwand Futterbereitstellung auf die Produkte aufgeteilt.

Tabelle 33: Variante 1 - Allokation des kumulierten Energieaufwandes auf die drei Produkte Milch, Schlachtkuh und Kalb

Produkte	Maßeinheit	Milch	Schlachtkuh	Kalb
Futterbereitstellung Milch	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.238		
Futterbereitstellung Schlachtkuh	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>		1.683	
Futterbereitstellung Kalb	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>			210
Futterbereitstellung Exkremente, Fortwärme, Methan aus der Verdauung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	5.662	2.942	368
Milchgewinnung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	4.581		
Nachzucht	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	1.923	1.923	1.923
Gebäude und bauliche Anlagen	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	269	269	269
Maschinen und technische Ausrüstung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	1.065	1.065	1.065
Σ kumulierter Energieaufwand	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	16.737	7.882	3.834
Anteil am kumulierten Energieaufwand	%	58,95	27,67	13,38

Mit 59 % hat die Milch in der *Variante 1* den höchsten Anteil am kumulierten Energieaufwand des Milchproduktionsverfahrens. Unter diesen Bedingungen beträgt die Energieintensität 2,09 MJ pro kg Milch.

*Variante 2* bezieht die Allokation des kumulierten Energieaufwands auf die 4 Produkte des Verfahrens. Die Zuordnung des Energieaufwands auf die Produkte erfolgt in *Variante 2.1* zu gleichen Anteilen auf die vier Produkte und unter Berücksichtigung des spezifischen Energieaufwands der Futterbereitstellung der einzelnen Produkte (Tabelle 34). Die Zuordnung des Energieaufwands zur Milchgewinnung bezieht sich komplett auf das Produkt Milch. Der Milch wird demnach 40 % und den Exkrementen 29 % des kumulierten Energieaufwands angelastet. Daraus ergibt sich eine Energieintensität von 1,41 MJ pro kg Milch. Für die Exkremente bedeutet das eine Energieintensität von 36,5 MJ pro kg N bei gleichwertiger Verteilung des Energieaufwandes auf die drei Düngestoffe N, P und K.

Tabelle 34: Variante 2.1 - Allokation des kumulierten Energieaufwands auf die Produkte Milch, Schlachtvieh, Kalb und Exkremente

Produkte	Maßeinheit	Milch	Schlacht- kuh	Kalb	Exkremente
Futter Milch	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.238			
Futter Schlachtkuh	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>		1.683		
Futter Kalb	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>			210	
Futter Exkremente	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>				4.928
Futter Fortwärme	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	815	815	815	815
Futter Methan aus der Verdauung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	212	212	212	212
Milchgewinnung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	4.581			
Nachzucht	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	1.408	1.408	1.408	1.408
Gebäude und bauliche Anlagen	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	201	201	201	201
Maschinen und technische Ausrüstung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	799	799	799	799
Σ Energieaufwand	MJ Produkt <sup>-1</sup>	11.253	5.117	3.644	8.301
Anteil am kumulierten Energieaufwand	%	39,74	18,07	12,87	29,32

Die Allokation des Energieaufwandes von *Variante 2.2* ist in Tabelle 35 dargestellt. Die Hauptbelastung der energetischen Allokation erfolgt hierbei auf das Zielprodukt Milch. Dabei wird der kumulierte Energieaufwand für die Milchgewinnung, die Nachzucht, die Gebäude und baulichen Anlagen sowie für die Maschinen und technische Ausrüstung

vollständig der Milch angelastet. Außerdem wird der Milch der kumulierte Energieaufwand der Futterbereitstellung für die Fortwärme und das Methan aus der Verdauung zugeschrieben. Damit beträgt der Anteil der Milch am kumulierten Energieaufwand 76 %. Das bedeutet pro kg Milch wird in dieser Variante der Allokation eine Energieintensität von 2,71 MJ benötigt. Für die Bildung der Exkreme werden demnach 17 % des kumulierten Energieaufwands eingesetzt. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Energieintensität von 21,3 MJ kg<sup>-1</sup> N. Die beiden Kuppelprodukte Schlachtkuh und Kalb haben mit insgesamt 7 % nur einen geringen Anteil am kumulierten Energieaufwand.

Tabelle 35: Variante 2.2 - Allokation des kumulierten Energieaufwands der Verfahrensabschnitte auf das Zielprodukt Milch, ausgenommen kumulierter Energieaufwand Futterbereitstellung der Kuppelprodukte

Produkte	Maßeinheit	Milch	Schlachtkuh	Kalb	Exkreme
Futter Milch	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.238			
Futter Schlachtkuh	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>		1.683		
Futter Kalb	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>			210	
Futter Exkreme	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>				4.867
Futter Fortwärme	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.238			
Futter Methan aus der Verdauung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	846			
Milchgewinnung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	4.581			
Nachzucht	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	5.630	0	0	0
Gebäude und bauliche Anlagen	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	806	0	0	0
Maschinen und technische Ausrüstung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.195	0	0	0
Σ Energieaufwand	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	21.555	1.683	210	4.867
Anteil am kumulierten Energieaufwand	%	76,13	5,94	0,74	17,19

Mit der Aufteilung des Energieaufwandes für die Futterbereitstellung der Schlachtkuh auf alle vier Produkte in *Variante 2.3* ergibt sich ein Anteil der Milch von 78 % am kumulierten Energieaufwand im Standardverfahren (Tabelle 36). Gemäß dieser Allokation wird eine Energieintensität von 2,76 MJ zur Herstellung von einem kg Milch benötigt. Für die Exkreme wird demzufolge ein Fünftel der eingesetzten Energie aufgewendet. Die Energieintensität beträgt 23,1 MJ pro kg N.

Tabelle 36: Variante 2.3 - Allokation des kumulierten Energieaufwands der Futterbereitstellung des Produkts Schlachtkuh auf alle Produkte

Produkte	Maßeinheit	Milch	Schlachtkuh	Kalb	Exkreme
Futter Milch	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.238			
Futter Schlachtkuh	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	421	421	421	421
Futter Kalb	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>			210	
Futter Exkreme	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>				4.867
Futter Fortwärme	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.258			
Futter Methan aus der Verdauung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	846			
Milchgewinnung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	4.581			
Nachzucht	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	5.630	0	0	0
Gebäude und bauliche Anlagen	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	806	0	0	0
Maschinen und technische Ausrüstung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.195	0	0	0
Σ Energieaufwand	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	21.976	421	631	5.287
Anteil am kumulierten Energieaufwand	%	77,61	1,49	2,23	18,67

In *Variante 2.4* ist die Allokation des kumulierten Energieaufwands auf alle Produkte des Verfahrens bezogen. Eine Besonderheit besteht darin, dass auch hier wie in *Variante 0* das Energieäquivalent für Mineraldünger für die Exkreme in die Berechnung einbezogen wird. Der Anteil des Energieaufwands aus dem Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung wird, wie in *Methode 2* beschrieben, auf die vier Produkte Milch, Schlachtkuh, Kalb und Exkreme aufgeteilt (Tabelle 37). Der Energieaufwand des Verfahrensabschnitts Milchgewinnung wird komplett der Milch zugeordnet. Der Energieaufwand der Verfahrensabschnitte Nachzucht, Gebäude und bauliche Anlagen sowie Maschinen und technische Ausrüstung wird gleichberechtigt zwischen den drei Produkten Milch, Schlachtkuh und Kalb geteilt. Damit ergibt sich ein Anteil in Höhe von 43 % für die Milch, von 22 % für die Schlachtkuh, von 19 % für die Exkreme und von 16 % für das Kalb am kumulierten Energieaufwand. Pro kg Milch ist entsprechend dieser Methode der Allokation eine Energieintensität von 1,53 MJ notwendig.



Tabelle 37: Variante 2.4 - Allokation des kumulierten Energieaufwands auf die Produkte unter Berücksichtigung des Mineräldüngeräquivalents für die Exkremente (Tabelle 30)

Produkte	Maßeinheit	Milch	Exkremente	Schlachtkuh	Kalb
Futter Milch	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.238	5.252		
Futter Schlachtkuh	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>			1.683	
Futter Kalb	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>				210
Futter Fortwärme	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	957		957	957
Futter Methan	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	282		282	282
Milchgewinnung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	4.581			
Nachzucht	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	1.877		1.877	1.877
Gebäude und bauliche Anlagen	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	269		269	269
Maschinen und technische Ausrüstung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	1.065		1.065	1.065
Σ Energieaufwand	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	12.270	5.252	6.133	4.660
Anteil am kumulierten Energieaufwand	%	43,33	18,55	21,66	16,46

Mit 59 % ist der Hauptanteil des kumulierten Energieaufwandes in *Variante 2.5* dem Zielprodukt Milch zugeordnet (Tabelle 38). Dabei erfolgt die Zuordnung unter der Annahme, dass alle für das Haltungssystem aufgewendeten Energien der Milch als Zielprodukt zugeordnet werden, da dieses System speziell für die Milchproduktion üblich und notwendig ist. Dagegen wird vorausgesetzt, dass die Produktion der Schlachtkuh, des Kalbes und der Exkremente nicht an Gebäude und technische Ausrüstungen gebunden ist. Lediglich der kumulierte Energieaufwand für die Maschinen, die zur Fütterung notwendig sind, wird allen vier Produkten entsprechend Methode 2 angelastet. Der kumulierte Energieaufwand des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung wird ebenfalls entsprechend Methode 2 auf alle vier Produkte aufgeteilt. Der kumulierte Energieaufwand, der mit der Futterbereitstellung für Fortwärme und für durch die Verdauung freigesetztes Methan aufgewandt wird, sowie der kumulierte Energieaufwand für die Nachzucht werden den drei Produkten Milch, Schlachtkuh und Kalb ebenfalls nach Methode 2 zugeordnet.

Tabelle 38: Variante 2.5 - "Quartil" - Allokation des kumulierten Energieaufwands entsprechend einer bestimmten Rangliste der Anteile der Produkte am Energieaufwand der jeweiligen Verfahrensabschnitte

Produkte	Maßeinheit	Milch	Schlacht- kuh	Kalb	Exkremente
Futter Milch	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.238			
Futter Schlachtkuh	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>		1.683		
Futter Kalb	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>			210	
Futter Exkremente	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>				4.867
Futter Fortwärme	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	2.056	1.069	133	
Futter Methan aus der Verdauung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	534	278	35	
Milchgewinnung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	4.581			
Nachzucht	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.554	1.847	230	0
Gebäude und bauliche Anlagen	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	806	0	0	0
technische Ausrüstung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	475	0	0	0
Maschinen Entmistung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	719			
Maschinen Fütterung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	647	336	42	973
Σ Energieaufwand	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	16.611	5.213	650	5.839
Anteil am kumulierten Energieaufwand	%	58,66	18,41	2,30	20,62

Die Allokation des kumulierten Energieaufwands erfolgt bei den Varianten 3 bezogen auf die entstehenden Energieoutputs im Verfahren.

In *Variante 3.1* werden alle entstehenden Energieoutputs, das heißt die Produkte sowie die Fortwärme und das Methan aus der Verdauung gleichberechtigt behandelt. Daraus ergibt sich ein Anteil von 33 % für die Milch und von 23 % für die Exkremente am kumulierten Energieaufwand (Tabelle 39). Das bedeutet eine Energieintensität von 1,18 MJ kg<sup>-1</sup> Milch sowie eine Energieintensität von 28,4 MJ pro kg N bei gleichwertiger Verteilung des Energieaufwands auf die drei Düngestoffe N, P und K. Den drittgrößten Anteil am Energieaufwand hat in dieser Variante die Fortwärme mit 17 %.

Tabelle 39: Variante 3.1 - Allokation des kumulierten Energieaufwands gleichberechtigt auf alle Produkte sowie Fortwärme und Methan aus der Verdauung

Produkte	Maßeinheit	Milch	Schlachtkuh	Kalb	Exkreme- mente	Fort- wärme	Methan aus der Verdau- ung
Futter Milch	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.238					
Futter Schlachtkuh	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>		1.683				
Futter Kalb	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>			210			
Futter Exkre- mente	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>				4.867		
Futter Fort- wärme	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>					3.258	
Futter Methan aus der Ver- dauung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>						846
Milchgewin- nung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	4.581					
Nachzucht	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	938	938	938	938	938	938
Gebäude und bauliche Anla- gen	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	134	134	134	134	134	134
Maschinen und technische Ausrüstung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	533	533	533	533	533	533
Σ Energieauf- wand	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	9.425	3.288	1.815	6.472	4.863	2.451
Anteil am kumulierter Energieauf- wand	%	33,29	11,61	6,41	22,86	17,18	8,66

In *Variante 3.2* wird der kumulierte Energieaufwand für das Standardverfahren aus ernährungsphysiologischer Sicht im gleichen Verhältnis auf die Produkte Fortwärme und Methan aus der Verdauung zugeordnet. Diese Variante der Allokation des kumulierten Energieaufwands erfolgt analog zur Zuordnung der Methode 2. So ergibt sich ein Anteil von 36 % am kumulierten Energieaufwand für das Zielprodukt Milch (Tabelle 40). Für die Produktion von einem kg Milch würden demnach 1,29 MJ benötigt werden. Die *Variante 3.2* zeigt weiterhin, dass der Anteil der Exkreme-  
mente am kumulierten Energieaufwand hierbei mit 31 % sehr hoch ist. Die Bereitstellung von Stickstoff aus den Exkrementen benötigt unter dieser Methode der Allokation eine Energieintensität von 38,4 MJ pro kg.

Tabelle 40: Variante 3.2 - Allokation des kumulierten Energieaufwands gemäß der Allokation im Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung

Produkte	Maßeinheit	Milch	Schlacht- kuh	Kalb	Exkre- men- te	Fort- wärme	Methan aus der Verdau- ung
Futter Milch	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	3.238					
Futter Schlachtkuh	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>		1.683				
Futter Kalb	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>			210			
Futter Exkre- mente	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>				4.867		
Futter Fort- wärme	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>					3.258	
Futter Methan aus der Ver- dauung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>						846
Milchgewin- nung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	4.581					
Nachzucht	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	1.279	665	83	1.971	1.294	338
Gebäude und bauliche Anla- gen	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	1.040	541	67	1.604	1.053	275
Maschinen und technische Ausrüstung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	183	95	12	282	185	48
Σ Energieauf- wand	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	10.322	2.984	372	8.723	5.791	1.507
Anteil am kumulierter Energieauf- wand	%	36,45	10,54	1,31	30,81	20,45	5,32

Die Allokation des kumulierten Energieaufwands in den *Varianten 4.1 und 4.2* wird unter ökonomischen Gesichtspunkten durchgeführt. Dabei werden für die Produkte Milch, Schlachtkuh, Kalb und Exkremente ökonomische Werte zugrunde gelegt (Tabelle 42).

Der Nährwert der einzelnen Produkte ist in Tabelle 41 dargestellt. Die Berechnung des Anteils an Fleisch pro Schlachtkuh bezieht sich auf ein Lebendgewicht der Kuh von 650 kg. Es wird von einer Schlachtausbeute von 60 % ausgegangen und entsprechend der Nutzungsdauer von 2 Jahren und 2 Monaten berechnet. Beim Kalb wird mit einem Lebendgewicht von 45 kg gerechnet, wobei hier eine Schlachtausbeute von 40 % berücksichtigt wird.

Tabelle 41: Nährwert der Produkte

	<b>Masse</b> <b>kg Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup></b>	<b>Nährwert*</b> <b>kJ 100 g<sup>-1</sup></b>	<b>Nährwert</b> <b>MJ</b>
Milch	8.000	290	23.200
Schlachtkuh	177	647	1.147
Kalb	18	582	105

\* HESEKER &amp; HESEKER, 2007

Tabelle 42: Einkommen (€ pro Kuh und Jahr)

	<b>kg Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup></b>	<b>€ kg<sup>-1</sup></b>	<b>€ Stück<sup>-1</sup></b>	<b>€ Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup></b>
Milch	8.000	0,37**		2.976
Schlachtkuh	177	2,47**		438
Kalb			87**	87
Exkrement				
N	80	1***		80
P	30	0,9***		27
K	120	0,5***		60
Σ Variante 4.1				3.668
Biogas*	3.000	0,4***		1.200
	kWh Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	€ kWh <sup>-1</sup>		
Σ Variante 4.2				4.868

\* nur in Variante 4.2 enthalten

\*\* Neue Landwirtschaft 04/2008

\*\*\* KTBL, 2005

Mit *Variante 4.1* wird deutlich, dass das Zielprodukt Milch mit 82,761 % den größten Anteil am ökonomischen Einkommen des Milchproduktionsverfahrens hat. Demzufolge wird die Milch mit einer Energieintensität von 2,93 MJ pro kg belastet.

Da in *Variante 4.2* die Exkimente vor ihrem Einsatz als Wirtschaftsdünger auch zur Produktion von Biogas genutzt werden, erhöht sich der ökonomische Wert des Milchproduktionsverfahrens. Der Anteil der Milch am ökonomischen Wert des Verfahrens liegt unter dieser Voraussetzung bei 62 % und der Anteil der Exkimente bei 27 %. Das bedeutet, der Milch wird eine Energieintensität von 2,20 MJ pro kg zugeordnet. Zur Produktion von 1 kWh wird unter den genannten Bedingungen eine Energieintensität von 2 MJ benötigt.

Tabelle 43 zeigt die Energieintensität der vier Produkte des Milchproduktionsverfahrens in Abhängigkeit der vorgestellten Allokationsvarianten. Der Fokus der Betrachtung liegt vorerst im Vergleich der unterschiedlichen Allokationsvarianten. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Energieintensität pro kg Milch unter ökonomischer Bewertung des Zielprodukts Milch nach *Variante 7* mit  $2,93 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch am höchsten ist. Trotzdem ist unter zuzüglicher Betrachtung des Nährwerts pro kg Milch ein Output/Input-Verhältnis von 1 : 1 vorhanden.

In *Variante 3.1* wird die Produktion der Milch mit einer Energieintensität von  $1,18 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch am positivsten bewertet. Allerdings baut diese Variante auf einen gleichberechtigten Energieaufwand der Verfahrensabschnitte Nachzucht, Gebäude und Maschinen auf alle 6 Energieoutputs des Verfahrens auf. Die Variante der Aufteilung des Energieaufwands ist jedoch nicht empfehlenswert, da hierbei eine Unterbewertung des Energieaufwands für die Milch erfolgt und im Gegensatz dazu der Energieaufwand auf die in der Produktion unerwünschten Energieoutputs Fortwärme und aus der Verdauung freigesetztes Methan überbewertet wird.

Die Energieintensität für die Produktion von Fleisch aus der Schlachtkuh und dem Kalb ist in *Variante 2.2* am geringsten, da hier der Milch als Zielprodukt jeglicher Energieaufwand des Verfahrens mit Ausnahme des spezifischen Energieaufwands für die einzelnen Produkte aus dem Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung zugewiesen wird. Der Energieaufwand für die Exkreme ist in *Variante 4.1* aufgrund deren niedriger ökonomischer Werte am geringsten.

Als Vorzugsvariante der Allokation ist *Variante 2.5* "Quartil" zu empfehlen. Der Vorteil dieser Variante ist die äußerst objektive Zuordnung des kumulierten Energieaufwands entsprechend der tatsächlichen Abhängigkeit der einzelnen Produkte von den unterschiedlichen Verfahrensabschnitten. So liegt die Energieintensität für die Milchproduktion bei  $2,08 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch. Die Energieintensität der Produkte Schlachtkuh, Kalb und Exkreme liegt in einem vergleichsweise niedrigen Bereich.

Tabelle 43: Energieintensität für die Erzeugung der Produkte im Milchproduktionsverfahren in Abhängigkeit der Allokationsvarianten

Varianten	Milch		Schlachtkuh		Kalb		Exkremente			
	MJ kg <sup>-1</sup>	MJ MJ <sup>-1</sup> Nährwert	MJ kg <sup>-1</sup>	MJ MJ <sup>-1</sup> Nährwert	MJ kg <sup>-1</sup>	MJ MJ <sup>-1</sup> Nährwert	MJ kg <sup>-1</sup> N	MJ kg <sup>-1</sup> P	MJ kg <sup>-1</sup> K	MJ kWh <sup>-1</sup>
0	2,88	0,99					22,98	22,76	22,76	
1	2,09	0,72	44,20	6,83	210,47	36,16				
2.1	1,41	0,49	28,87	4,46	202,44	34,78	36,32	35,97	35,97	
2.2	2,69	0,93	0,21	1,47	11,66	2,00	21,29	21,09	21,09	
2.3	2,75	0,95	2,37	0,37	35,03	6,02	23,13	22,91	22,91	
2.4	1,53	0,53	34,60	5,35	258,90	44,48	22,98	22,76	22,76	
2.5	2,08	0,72	29,40	4,54	36,11	6,20	25,55	25,30	25,30	
3.1	1,18	0,41	18,55	2,87	100,85	17,33	28,31	28,05	28,05	
3.2	1,29	0,44	16,83	2,60	20,66	3,55	38,16	37,80	37,80	
4.1	2,93	1,01	19,45	3,01	38,06	6,54	3,27	3,24	3,24	
4.2	2,20	0,76	14,58	2,25	28,54	4,90	33,45	33,13	33,13	2

#### **4.7 Indikatorenermittlung zur Energieintensität in der Milchviehhaltung und Ableitung von Zielwerten zur Einschätzung der Nachhaltigkeit des Milchproduktionsverfahrens**

Der Energieaufwand in der Tierhaltung ist ein weiterer Baustein bei der Entwicklung eines Agrarumwelt-Indikatorensystems. Es ist darauf hinzuweisen, dass der Indikator Energieintensität immer unter Berücksichtigung weiterer relevanter Agrarumwelt-Indikatoren betrachtet werden sollte. Aus energetischer Sicht ist besonders die Einsparung fossiler Energien von Bedeutung. Der zur Produktion aufgewendete Energieaufwand ist ein deutlicher Zeiger für den Verbrauch von Ressourcen und der Verursachung von Treibhausgasemissionen in der Tierproduktion. Dargestellt wurde bereits der starke Einfluss der Verfahrensgestaltung auf den kumulierten Energieaufwand. Weitere Abhängigkeiten bestehen in den Standortbedingungen des Betriebes als auch in dem Energieaufwand zur Herstellung von bestimmten Betriebsmitteln.

##### **4.7.1 Beschreibung von Indikatoren zur Energieintensität in der Milchproduktion am Beispiel des Standardverfahrens**

Als Hilfsmittel zur Indikatorenermittlung wird auf das Driving-Force-State-Response-Modell (DSR) aufgebaut. Von besonderem Interesse sind in dieser Arbeit die Driving-Force-Indikatoren. Die Ermittlung von Driving-Force-Indikatoren ist erstrebenswert, da sie bereits frühzeitig auf Problemstellen in der Produktion aufmerksam machen. Die Driving-Force-Indikatoren können zur Gesamtbewertung des Energieaufwandes in der Tierhaltung herangezogen und als verfahrensumschließende Parameter wie die Energieintensität pro Produkt (kg Milch oder kg Fleisch) ausgedrückt werden. Die Eignung verschiedener Indikatoren wird in Hinblick auf den Aspekt der Nachhaltigkeit analysiert.

Zur besseren Veranschaulichung der Indikatoren wird im Folgenden die Darstellung in Netzdiagrammtechnik genutzt. Diese Form der Visualisierung ist eine häufig genutzte Form bei Indikatorenmodellen (BOCKSTALLER ET AL., 1997; HEISSENHUBER, 2000; HÜLSBERGEN, 2003). Als Bezugsbasis wird wie in den bisherigen Kalkulationen die Energieintensität pro Kilogramm Hauptprodukt, in diesem Fall die Milch, eingesetzt. Dargestellt sind in Abbildung 29 die drei Beispielsvarianten Standardverfahren, Variante 1 mit der minimalen Energieintensität und Variante 2 mit der maximierten Energieintensität aus Abschnitt 4.5.

Aus Abbildung 29 geht deutlich hervor, welchen starken Einfluss die Verfahrensschnitte Futterbereitstellung und Nachzucht auf die Energieintensität ausüben. Es ist



deutlich zu erkennen, dass mit veränderten Haltungssystemen diese Parameter beeinflusst werden. Die Verfahrensabschnitte Maschinen und technische Ausrüstung sowie Milchgewinnung üben ebenfalls einen Einfluss auf die Energieintensität aus. Dieser Einfluss beträgt entsprechend der durchgeführten Kalkulation maximal 3 % und wird daher als sehr gering eingestuft. Abbildung 29 verdeutlicht weiterhin den unbedeutenden Anteil des Energieaufwands der Gebäude an der Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens.

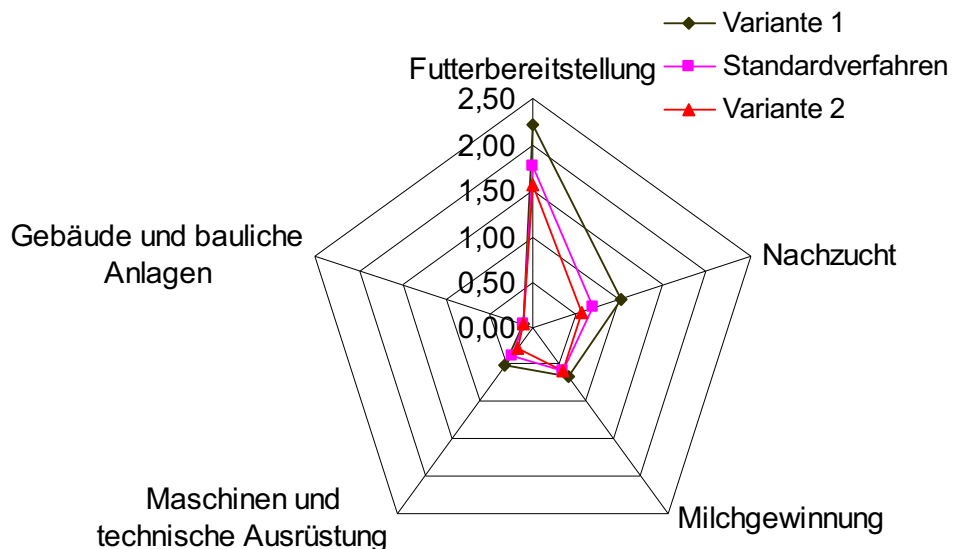


Abbildung 29: Energieintensität Standardverfahren, Variante 1 und Variante 2 [MJ kg<sup>-1</sup> Milch]

Die Bewertung der Indikatoren erfolgt unter Festlegung von Zielwerten. Bislang befinden sich noch die meisten Zielvorstellungen zu Agrarumwelt-Indikatoren im Diskussionsstadium. Nur vereinzelt liegen bereits festgelegte Grenzwerte vor. Auch im Folgenden werden lediglich Diskussionswerte zur energieeffizienten Wirtschaftsweise in der Tierhaltung vorgestellt. Das Empfehlen von Zielwerten zum Energieaufwand in der Tierhaltung erweist sich als sehr schwierig, da hierbei auf eine Vielzahl von Abhängigkeiten und auch Unsicherheiten aufgebaut werden muss.

Als vereinfachender Schritt werden die ermittelten Indikatorenwerte in dimensionslose Werte überführt. Die ökologisch ungünstige Situation wird mit dem Wert 0 und die ökologisch günstige Situation mit dem Wert 1 gekennzeichnet. Für die einzelnen Indikatoren werden Optimalbereiche definiert.

Die Berechnungen zeigen, dass starke Spannweiten die Energieintensität bei der Rationsgestaltung zu beachten sind. Als eindeutig am energieeffizientesten hat sich hierbei die Rationszusammensetzung mit einem hohen Anteil an Weide herausgestellt. Die Un-

tersuchungen von REFSGAARD ET AL. (1998) und KELM (2003) bestätigen den energetischen Vorteil der Weidenutzung gegenüber der ganzjährigen Stallhaltung. Die Energieintensität für die Bereitstellung einer Futterration mit Ganztagsweide ist in allen betrachteten Ertragsklassen ab  $1,7 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch möglich. Daher wird eine Energieintensität von  $1,7 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch und darunter als am nachhaltigsten interpretiert. Am energetisch ungünstigsten haben sich Rationen mit einem hohen Anteil an Kraftfutter sowie Rationen ohne Weidefutter herauskristallisiert. Der Optimalbereich der Energieintensität für die Futterbereitstellung liegt zwischen  $1,7 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch und  $2 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch. Als Grenzwert ist  $2 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch definiert worden, da die Bereitstellung einer ohnehin energieintensiven Futterration der ganzjährigen Stallhaltung für alle berücksichtigten Ertragsklassen auch unter  $2 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch möglich ist. Alle Rationen, die eine höhere Energieintensität benötigen, sind als nicht nachhaltig einzustufen.

Abbildung 30 stellt die Bewertung der Nachhaltigkeit in Abhängigkeit der Energieintensität der Futterbereitstellung dar.

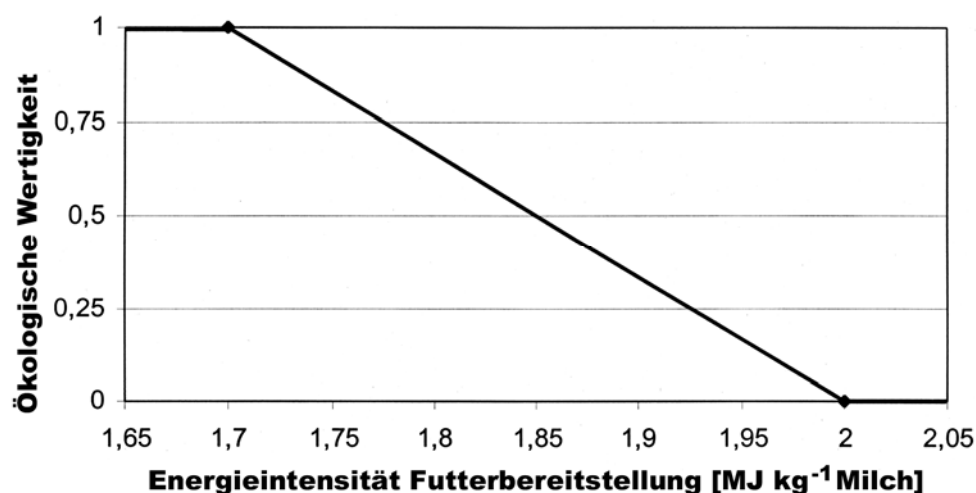


Abbildung 30: Darstellung des Grenzwertbereichs des Indikators Energieintensität für den Verfahrensabschnitt Futtermittelbereitstellung im Milchproduktionsverfahren

Die Energieintensität des Bereichs Nachzucht kann ab und unter  $0,4 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch am energetisch nachhaltigsten bezeichnet werden (Abbildung 31). Diese Angabe bezieht sich auf einen Umfang der Reproduktionsrate von bis zu 25 %. Der Leistungszuwachs bei einer Herdenleistung von 8.000 kg Milch liegt im Reproduktionsbereich zwischen 25 % und 30 % am höchsten (WEIHER, 2004). Mit Abnahme der Nutzungsdauer der Milchkühe wird das Leistungspotenzial des Einzeltiers nicht ausreichend genutzt.

WEIHER (2004) empfiehlt bei Herdenleistungen über 8.000 kg aus Sicht des Selektionsfortschritts sogar eine Reproduktionsrate deutlich unter 35 %. Da bei einer Reproduktionsrate von 40 % das Tier nicht einmal seinen physiologischen Leistungshöhepunkt erreichen kann (WANGLER, 2006), werden diese als auch alle darüber liegenden Reproduktionsraten als nicht nachhaltig bewertet. Dies entspricht in den vorgestellten Berechnungen mit ganztägiger Weidefütterung im Sommer einer Energieintensität ab  $0,7 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch.

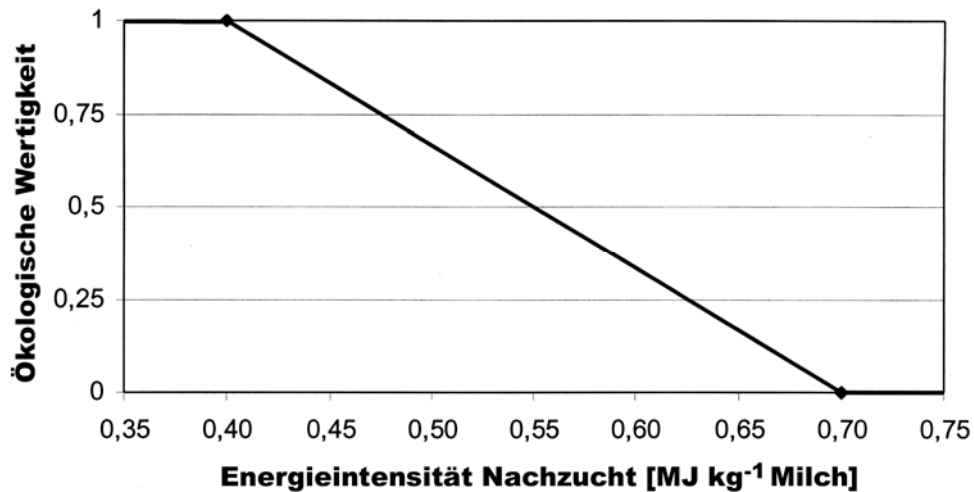


Abbildung 31: Darstellung des Grenzwertbereichs des Indikators Energieintensität für den Verfahrensabschnitt Nachzucht im Milchproduktionsverfahren

Als übergeordneter Indikator wird im Folgenden der Diskussionswertebereich der Energieintensität für das geschlossene Milchproduktionsverfahren vorgestellt (Abbildung 32). Als Optimalbereich wird eine Energieintensität von  $3 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch bis  $4 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch vorgeschlagen. Der energieeffizienteste Wert bildet ein Milchproduktionsverfahren ab, welches in allen Verfahrensabschnitten die energetisch günstigsten Varianten nutzt. Mit der Zunahme der Energieintensität wird deutlich, dass Verfahrensvarianten gewählt werden, welche sich negativ auf die Energieeffizienz auswirken. Das Milchproduktionsverfahren ist nicht nachhaltig, wenn für die Produktion von einem Kilogramm Milch mehr als  $4 \text{ MJ}$  aufgewendet werden.

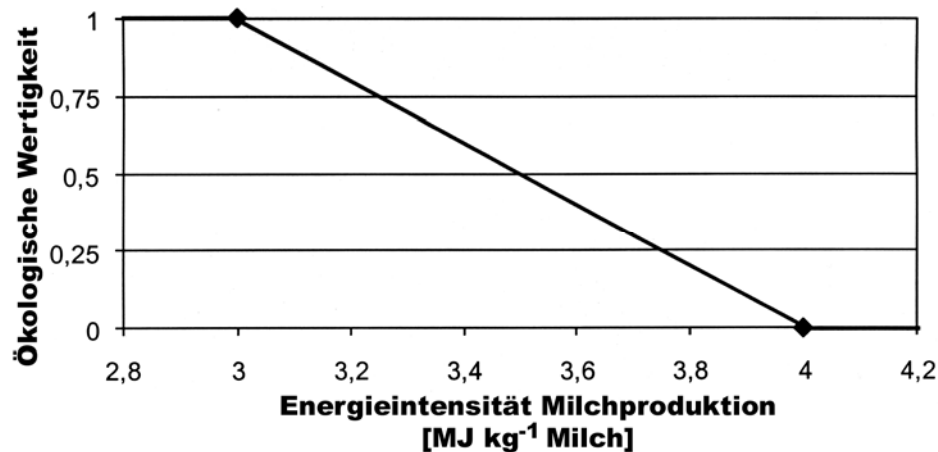


Abbildung 32: Darstellung des Grenzwertbereichs des Indikators Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens

Der Energieaufwand im Tierhaltungsverfahren eines Betriebes wird von vielen unterschiedlichen Parametern beeinflusst. Es soll an dieser Stelle betont werden, dass eine holistische Betrachtung des Tierhaltungssystems unbedingt notwendig ist, um treffende Aussagen und Indikatoren zur Bewertung derartiger Systeme machen zu können. Dazu zählen die Standortbedingungen des Betriebes, der Arbeitskräfteeinsatz als auch die angestrebte Leistung der Tiere. Einen starken Einfluss auf den Indikator Energieintensität des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung übt das Ziel der Steigerung der Milchleistung aus. Durch das Vorantreiben der ganzjährigen Stallhaltung wird das energetisch günstigere Verfahren Weidehaltung zunehmend verdrängt.

#### 4.7.2 Beschreibung des Indikators Energieeffizienz der Milchproduktion am Beispiel des Standardverfahrens

Die Energieeffizienz im Milchproduktionsverfahren ist als Indikator zur Beschreibung der Nachhaltigkeit eines landwirtschaftlichen Systems nutzbar. Sowohl der alleinige Bezug zum Zielprodukt Milch als auch auf die anderen Kuppelprodukte des Verfahrens kann hierbei als Indikator der Energieeffizienz dienen.

Um die Energieeffizienz im Verfahren Milchproduktion zu ermitteln, ist es notwendig, für das Zielprodukt sowie für die Kuppelprodukte im Verfahren eine energetische Bewertung vorzunehmen. Die Berechnung für die Energieoutputs nach energetischem Nährwert für die menschliche Ernährung ist in Tabelle 41 (S. 111) abgebildet. Das Zielprodukt des Verfahrens ist hierbei die Milch, welche einen Nährwert von 2,9 MJ pro kg (HESEKER & HESEKER, 2007) hat und somit auch mit einem Energieoutput in diesem

Umfang gewertet wird. Für das Fleisch der Schlachtkuh werden 1.147 MJ in die Berechnungen eingebracht sowie für das Kalb 105 MJ. Für die Exkreme wird der Energieoutput der Gülle 1 (Tabelle 31, S. 102) in Höhe von 4.638 MJ zugrunde gelegt.

Insgesamt ergibt sich damit ein Energieoutput von 29.090 MJ pro Kuh und Jahr. Für das gesamte Milchproduktionsverfahren wird ein Energieaufwand, welcher als Energieinput gewertet wird, von 28.315 MJ pro Kuh und Jahr aufgewandt. Daraus ergibt sich ein Energieoutput/Energieinput-Verhältnis (OI), welches nach Gleichung (32) (S. 55) ermittelt wird, von 1,03.

$$OI = \frac{29.090 \text{ MJ}}{28.315 \text{ MJ}} = 1,03$$

Das bedeutet, dass im Milchproduktionsverfahren der Energieoutput etwa dem Energieinput entspricht. Erreicht ein Produktionsverfahren ein Energieoutput/Energieinput-Verhältnis von 1, so ist es energetisch als nachhaltig einzustufen. Danach ist festzustellen, dass das Verfahren als energieeffizient zu werten ist. Berücksichtigt werden muss jedoch, dass dieses Verhältnis nur durch die in diesen Berechnungen nicht berücksichtigte Sonnenenergie und Nährwerte der Futtermittel möglich ist.

Beschränkt sich die Berechnung des Energieoutput/Energieinput-Verhältnisses nur auf das Energieoutput des Zielprodukts Milch, wird entsprechend, unter Verwendung von Gleichung (32) (S. 55), ein Verhältnis von 0,82 ermittelt.

$$OI = \frac{23.200 \text{ MJ}}{28.315 \text{ MJ}} = 0,82$$

In diesem Fall zeigt das Energieoutput/Energieinput-Verhältnis, dass ein Fünftel des Energieaufwands aus dem Verfahren entweicht.

## **4.8 Anwendung der Energiebilanzierungsmethode anhand von Untersuchungsbetrieben**

### **4.8.1 Ermittlung der Energieintensität für das Milchproduktionsverfahren am Beispiel des Untersuchungsbetriebs 1**

---

Untersuchungsbetrieb 1 ist ein landwirtschaftlicher Familienbetrieb aus dem Nordosten Deutschlands. In den Kalkulationen werden die drei Untersuchungsjahre 2004, 2005 und 2006 betrachtet. Die Hauptproduktionsrichtung des Betriebes ist die Milchproduktion. Die Betriebsflächen liegen über 15 m über NN. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 8,1 °C und das langjährige Niederschlagsmittel 570 mm a<sup>-1</sup>. Der Untersuchungsbetrieb 1 verfügt über eine landwirtschaftliche Nutzfläche von 125 ha. Davon sind 65 ha

Ackerland und 60 ha Grünland. Die durchschnittliche Ackerzahl des Betriebes ist 31. Die Eigenschaften und Leistungen der Flächen des Untersuchungsbetriebes 1 sind mit der Ertragsklasse 3 aus dem Standardverfahren vergleichbar (Abschnitt 3.4). Die Flächen des Betriebes werden überwiegend zur Futterproduktion genutzt. Pflanzliche Marktprodukte, die den Betrieb verlassen, sind Raps und ein Teil des Winterweizens. Die tierischen Marktprodukte sind Milch, Zuchttiere und Fleisch.

Einbezogen in die Berechnung sind der Energieaufwand für die Futterbereitstellung für Milchkühe und für Nachzucht sowie für die Milchgewinnung und Milchlagerung. Bei der Ermittlung des Energieaufwands für die Futterbereitstellung ist das gesamte Produktionsverfahren des Pflanzenbaus berücksichtigt. Die Bereiche Gebäude und bauliche Anlagen sowie Maschinen und technische Ausrüstung sind entsprechend den Haltungsbedingungen im Betrieb enthalten. Diese Bereiche wurden anhand von Werten des Standardverfahrens pro Tierplatz berechnet. Da die Jungrinder im Untersuchungsbetrieb 1 auf Festmist und nicht auf Spaltenboden gehalten werden, wurde bei der Berechnung des Energieaufwands für das Stallgebäude vom Jungvieh, anders als im Standardverfahren, der Energieaufwand eines Jungviehstalls ohne Spaltenboden und Güllekanäle gewählt.

Der Tierbestand hat im Untersuchungszeitraum keine bedeutenden Veränderungen zu verzeichnen. Im Durchschnitt der betrachteten Jahre betrug der Tierbestand 56 GV Milchkühe und 30 GV Kälber und Jungrinder. Innerhalb der drei Untersuchungsjahre ist die Milchleistung pro Kuh und Jahr um 8,5 % angestiegen. Im Jahr 2004 betrug die Milchleistung  $7.900 \text{ kg Kuh}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ , im Jahr 2005  $8.400 \text{ kg Kuh}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$  und im Jahr 2006  $8.570 \text{ kg Kuh}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ .

Die Milchkühe werden in einem Liegeboxenlaufstall mit Flüssigtmistung gehalten. Die Futtermischung wird in Form einer Totalmischung mit dem Futtermischwagen vorgelegt. Im Sommer werden die Milchkühe halbtags auf der Weide gehalten und die Jungrinder ganztägig.

Tabelle 44 macht deutlich, dass die mithilfe von REPRO ermittelte Energiebilanz des Bereichs Pflanzenbau im Untersuchungsbetrieb 1 nur leichter Schwankung unterliegt. Dabei zeigt sich das Jahr 2005 als energieeffizientestes Jahr mit dem günstigsten Einsatz fossiler Energie und dem höchsten Output/Input-Verhältnis.

Tabelle 44: Energiebilanz Pflanzenbau des Untersuchungsbetriebes 1

Jahr	Maßeinheit	2004	2005	2006	Mittelwert
Einsatz fossiler Energie	GJ ha <sup>-1</sup>	10,18	9,65	10,60	10,14
Energieoutput	GJ ha <sup>-1</sup>	84,77	86,73	80,84	84,11
Energiegewinn	GJ ha <sup>-1</sup>	74,59	77,08	70,24	73,97
Output/Input-Verhältnis		8,32	8,98	7,63	8,29

Die pflanzenbauliche Anbaustruktur im Untersuchungsbetrieb variiert über die drei geprüften Jahre etwas (Tabelle 45). Am auffälligsten ist, dass der Anteil von Mais um ein Drittel zunimmt.

Tabelle 45: Anbaustruktur Untersuchungsbetrieb 1

Kennwert	Maßeinheit	2004	2005	2006	Mittelwert
Winterraps	ha <sup>-1</sup>	11,39	8,10	8,08	9,19
Wintergerste	ha <sup>-1</sup>	8,10	8,08	5,86	7,35
Winterweizen	ha <sup>-1</sup>	4,60	5,86	6,27	5,58
Triticale	ha <sup>-1</sup>	8,08	6,66	4,60	6,45
Mais	ha <sup>-1</sup>	15,88	19,34	23,24	19,49
Grünland	ha <sup>-1</sup>	59,49	59,49	59,49	59,49
Selbstbegrünung	ha <sup>-1</sup>	17,51	17,51	17,51	17,51

Die Ertragsentwicklung schwankt über den Untersuchungszeitraum (Tabelle 46). Das Jahr 2006 hat im Vergleich die geringsten Erträge.

Tabelle 46: Entwicklung der Erträge des Untersuchungsbetriebes 1

Kennwert	Maßeinheit	2004	2005	2006	Mittelwert
Winterraps	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	39	34	47	40
Wintergerste	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	75	70	70	72
Winterweizen	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	75	75	65	72
Triticale	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	60	65	50	58
Mais	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	280	300	250	277
Grünland	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	270	300	250	263
Selbstbegrünung	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	15	15	15	15

Die Entwicklung des Düngemiteleinsatzes schwankt in Abhängigkeit der unterschiedlichen Fruchtarten. So ist bei dem Anbau von Mais und teilweise beim Winterraps eine Abnahme von Stickstoff- und Phosphordüngung zu verzeichnen, jedoch bei den anderen

Fruchtarten eine Zunahme (Tabelle 47). Der Einsatz von Kalium nimmt bei allen Fruchtarten im Untersuchungszeitraum ab.

Tabelle 47: Entwicklung des Düngemiteleinsatzes im Untersuchungsbetrieb 1

Kennwert	2004			2005			2006		
	kg N [ha <sup>-1</sup> ]	kg P [ha <sup>-1</sup> ]	kg K [ha <sup>-1</sup> ]	kg N [ha <sup>-1</sup> ]	kg P [ha <sup>-1</sup> ]	kg K [ha <sup>-1</sup> ]	kg N [ha <sup>-1</sup> ]	kg P [ha <sup>-1</sup> ]	kg K [ha <sup>-1</sup> ]
Winterraps	274	36	179	282	36	178	236	37	133
Wintergerste	131	15	87	131	15	87	159	72	0
Winterweizen	131	15	87	131	15	87	135	36	78
Triticale	110	22	83	110	22	83	131	33	72
Mais	292	40	163	276	36	146	254	30	132
Grünland	142	21	112	139	20	118	159	51	87

Mit durchschnittlich 53 % hat der Bereich Futterbereitstellung den größten Anteil am kumulierten Energieaufwand im Untersuchungsbetrieb 1. Für den Bereich der wirtschaftseigenen Futtermittel wurden betriebsspezifische Werte ermittelt (Tabelle 48) (Tabellen A14 bis A17).

Das Grünland des Betriebes wird in drei Schnitten genutzt. Das Welkgut zur Grassilagebereitung wird im ersten Schnitt generell nur mit dem Feldhäcksler geerntet. Im zweiten Schnitt erfolgt die Ernte des Welkguts für die Grassilagebereitung in Silageballen. Der dritte Schnitt wird zur Heuproduktion verwendet. Die Beweidung erfolgt auf dem Betrieb von Ende April bis Anfang Oktober auf den dafür vorgesehenen Flächen.

Es sind deutliche Unterschiede beim Energieaufwand der Futtermittel zu erkennen. Eine geeignete Bezugsgröße für den Energieaufwand ist die Trockenmasse der Futtermittel. Der geringste Energieaufwand je dt TM bei der Futtermittelproduktion auf dem Grünland wird bei der Beweidung erreicht. Wobei zu beachten ist, dass für die Kalkulation des Energieaufwands für das Weidefutter die Exkremente der Tiere energetisch mit Null bewertet werden. Der höchste Energieaufwand wird bei der Produktion von Heu benötigt. Die Produktion von Grassilage mit dem Feldhäcksler hat einen um 31 % höheren Energieaufwand als die Produktion von Grassilage in Form von Silageballen.

Die Berechnungen zeigen, dass der Energieaufwand für die Herstellung der Grundfuttermittel im Betrieb schwankt. Ursachen dafür sind der Einfluss der Erträge und der Einsatz von Düngemitteln. Besonders negativ wirkt sich der deutliche Nährstoffüberschuss bei der Maisproduktion auf die Energiebilanz des Betriebs aus. Der Überschuss beträgt bei der Maisproduktion durchschnittlich 188 kg N ha<sup>-1</sup>. Aufgrund der angemessenen Düngung im Getreideanbau wird für den Produktionsbereich Ackerbau jedoch ein



durchschnittlicher Nährstoffüberschuss von 97 kg N ha<sup>-1</sup> ermittelt. Der Nährstoffüberschuss des Grünlands beträgt 76 kg N ha<sup>-1</sup>.

Tabelle 48: Energieintensität [MJ kg<sup>-1</sup> TM] der Herstellung wirtschaftseigener Futtermittel des Untersuchungsbetriebes 1

Kennwert	Maßeinheit	2004	2005	2006	Mittelwert
Maissilage*	MJ kg <sup>-1</sup> TM	2,40	2,09	2,24	2,24
Grassilage Feldhäcksler**a	MJ kg <sup>-1</sup> TM	1,92	1,62	2,33	1,96
Grassilage Silageballen**a	MJ kg <sup>-1</sup> TM	1,47	1,24	1,78	1,50
Weide	MJ kg <sup>-1</sup> TM	1,42	1,33	1,72	1,49
Weide ohne Energieaufwand Exkrement	MJ kg <sup>-1</sup> TM	0,87	0,95	1,31	1,04
Heu***a	MJ kg <sup>-1</sup> TM	3,84	3,24	4,66	3,91
Wintergerste	MJ kg <sup>-1</sup> TM	1,66	1,73	2,24	1,88
Winterweizen	MJ kg <sup>-1</sup> TM	1,69	1,68	2,17	1,85
Triticale	MJ kg <sup>-1</sup> TM	2,20	1,99	2,91	2,36

\* inklusive 15 % Verluste (REPRO) <sup>a</sup> 3 Schnitte

\*\* inklusive 20 % Verluste (REPRO)

\*\*\* inklusive 30 % Verluste (REPRO)

Die Zusammensetzung der Futterration der Milchkühe ist über die drei untersuchten Jahre ähnlich. Durchschnittlich bestehen 50 % der Futterration aus Kraftfuttermitteln und 50 % aus Grundfuttermitteln. Nur im Jahr 2005 ist das Verhältnis Kraftfutter/Grundfutter 46 %/54 %.

Zur Milchgewinnung wird ein 2 × 5-Fischgrätenmelkstand eingesetzt. Die Milch wird in einem Direktkühlverfahren in einem Kühltank gelagert und jeden zweiten Tag vom Betrieb abgeholt. Zur Unterstützung der Reinigung der Melkanlage in Form der Kochendwasserreinigung wird das durch die Wärmerückgewinnung erhitzte Wasser von der Milchkühlung genutzt. Mit zunehmender Milchmenge im Betrieb ist zu erkennen, dass der kumulierte Energieaufwand für den Verfahrensabschnitt Milchgewinnung abnimmt. Zu beachten ist, dass im Jahr 2006 aufgrund einer Bestandsverringerung der Energieaufwand des gesamten Betriebs trotz steigender Einzeltierleistung ansteigt.

Der Energieaufwand für die Verfahrensabschnitte Gebäude und bauliche Anlagen sowie Maschinen und technische Ausrüstung ist entsprechend den ermittelten Daten im Standardverfahren an die Bedingungen des Untersuchungsbetriebes 1 angepasst.

Die Energieintensität zur Produktion von einem Kilogramm Milch in den Untersuchungsjahren schwankt bis zu 14 % (Tabelle 49). Die Energieintensität ist im Jahr 2005

geringer als in den beiden Vergleichsjahren. Bedingt ist dies durch die einerseits höheren Erträge in diesem Jahr, welche gekoppelt mit einem geringeren Düngemiteleinsatz zu einem niedrigeren Energieaufwand zur Herstellung der Futtermittel führt. Die Energieintensität ist abhängig von den natürlichen und betrieblichen Bedingungen, insbesondere dem Ertrag.

Tabelle 49: Energieintensität im Untersuchungsbetrieb 1 ohne Berücksichtigung des Energieaufwands für die Exkremente auf der Weide

	<b>Maßeinheit</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>Mittelwert</b>
Futterbereitstellung	MJ kg <sup>-1</sup> Milch	2,11	1,90	2,40	2,14
Nachzucht	MJ kg <sup>-1</sup> Milch	0,76	0,73	0,82	0,77
Milchgewinnung	MJ kg <sup>-1</sup> Milch	0,56	0,49	0,50	0,52
Gebäude und bauliche Anlagen	MJ kg <sup>-1</sup> Milch	0,10	0,10	0,10	0,10
Maschinen und technische Ausrüstung	MJ kg <sup>-1</sup> Milch	0,44	0,44	0,44	0,44
<b>Σ Energieintensität</b>	<b>MJ kg<sup>-1</sup> Milch</b>	<b>3,97</b>	<b>3,66</b>	<b>4,27</b>	<b>3,97</b>

#### 4.8.2 Ermittlung der Energieintensität für das Milchproduktionsverfahren am Beispiel des Untersuchungsbetriebs 2

Untersuchungsbetrieb 2 ist eine Agrargenossenschaft. Die Kalkulationen beziehen sich auf die drei Untersuchungsjahre 2003, 2004 und 2005. Die Hauptproduktionsrichtung des Betriebs ist die Milchproduktion. Die Betriebsflächen liegen in der Region Nordost-Deutschland. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 8,6 °C und das langjährige Niederschlagsmittel 523 mm a<sup>-1</sup>. Es wird eine Fläche von 1.414 ha bewirtschaftet. Davon werden 1.130 ha als Ackerland und 280 ha als Grünland genutzt. Die durchschnittliche Ackerzahl des Betriebes ist 50. Die Eigenschaften und Leistungen der Flächen sind mit der Ertragsklasse 2 des Standardverfahrens (Abschnitt 3.4) vergleichbar. Neben der Milchproduktion gehört die eigene Nachzucht und Mutterkuhhaltung zum Betrieb.

Untersuchungsbetrieb 2 hat einen Milchkuhbestand von 250 GV und eine durchschnittliche Milchleistung von 8.800 kg Kuh<sup>-1</sup> und Jahr<sup>-1</sup>. Der Tierbestand hat im Untersuchungszeitraum keine bedeutenden Veränderungen zu verzeichnen. Im Durchschnitt der betrachteten Jahre werden 143 GV Kälber und Jungrinder zur Nachzucht auf dem Betrieb gehalten. Innerhalb der drei Untersuchungsjahre ist die Milchleistung pro Kuh und Jahr nur in einem geringen Umfang angestiegen. Im Jahr 2003 betrug die Milchleistung

8.872 kg Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup>, im Jahr 2004 8.600 kg Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup> und im Jahr 2005 8.991 kg Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup>. Die Tiere werden in einem Liegeboxenlaufstall mit Flüssigmistung gehalten. Die Futterration wird in Form einer Totalmischration mit dem Futtermischwagen vorgelegt. Die Milchkühe werden im Sommer halbtags auf der Weide gehalten und die Jungrinder ganztägig. Wie bei Untersuchungsbetrieb 1 (Abschnitt 4.9.1) beschrieben, wurden die Bereiche Gebäude und bauliche Anlagen sowie Maschinen und technische Ausrüstung unter Anwendung von Werten des Standardverfahrens pro Tierplatz berechnet. Hierbei wurde in die Berechnungen aufgrund der betriebsindividuellen Bedingungen ebenfalls der Energieaufwand für einen Jungviehstall ohne Spaltenboden und Güllekanäle einbezogen.

In Tabelle 50 sind die anhand von REPRO ermittelten Ergebnisse zur Energiebilanz des Pflanzenbaus im Untersuchungsbetrieb 2 dargestellt. Es ist dabei deutlich zu erkennen, dass der Energieeinsatz im Vergleich der 3 untersuchten Jahre Schwankungen unterliegt. Das Jahr 2005 ist hierbei am wenigsten energieeffizient.

Tabelle 50: Energiebilanz Pflanzenbau Untersuchungsbetrieb 2

<b>Jahr</b>	<b>Maßeinheit</b>	<b>2003</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>Mittelwert</b>
Einsatz fossiler Energie	GJ ha <sup>-1</sup>	11,50	12,99	12,01	12,16
Energieoutput	GJ ha <sup>-1</sup>	83,84	113,90	108,08	101,88
Energiegewinn	GJ ha <sup>-1</sup>	72,34	100,91	96,07	89,72
Output/Input-Verhältnis		7,29	8,77	9,00	8,38

Die Anbaustruktur des Untersuchungsbetriebs 2 schwankt im Vergleich der drei Untersuchungsjahre (Tabelle 51). Deutlich zu erkennen ist, dass die Flächen zur Selbstbegrünung deutlich zurückgegangen sind. Tendenziell nimmt der Anbau von Ölfrüchten und Mais zu.

Tabelle 51: Anbaustruktur Untersuchungsbetrieb 2

Kennwert	Maßeinheit	2003	2004	2005	Mittelwert
Winterraps	ha <sup>-1</sup>	160	184	182	176
Erbsen	ha <sup>-1</sup>	37	32	14	27
Wintergerste	ha <sup>-1</sup>	194	156	180	176
Winterweizen	ha <sup>-1</sup>	286	328	336	317
Winterroggen	ha <sup>-1</sup>	118	90	98	102
Sommerweizen	ha <sup>-1</sup>	15	7	0	11
Zuckerrüben	ha <sup>-1</sup>	80	38	68	62
Silomais	ha <sup>-1</sup>	129	135	142	135
Grünland	ha <sup>-1</sup>	272	235	282	263
Selbstbegrünung	ha <sup>-1</sup>	418	201	292	304
Betriebsfläche	ha <sup>-1</sup>	1.423	1.406	1.414	1.414

Die Erträge während der untersuchten Jahre schwanken deutlich (Tabelle 52). Im Jahr 2004 werden durchschnittlich die höchsten Erträge erzielt. Die Erträge im Jahr 2003 sind durch ungünstige Wetterbedingungen deutlich geringer als die Erträge der anderen beiden Jahre.

Tabelle 52: Entwicklung der Erträge des Untersuchungsbetriebs 2

Kennwert	Maßeinheit	2003	2004	2005	Mittelwert
Winterraps	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	21,63	37,07	37,11	31,94
Erbsen	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	23,28	46,38	24,38	31,35
Wintergerste	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	50,56	63,13	64,39	59,36
Winterweizen	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	51,60	57,34	62,61	57,18
Winterroggen	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	42,52	56,52	46,87	48,64
Sommerweizen	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	52,21	37,69	0	44,95
Zuckerrüben	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	411,64	565,58	605,33	527,52
Silomais	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	330	440,34	322,97	364,44
Grünland	dt FM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	248	365,08	305,14	306,13

Die Entwicklung des Düngemiteleinsatzes im Untersuchungsbetrieb 2 ist von 2003 zu 2004 tendenziell abnehmend, wobei bei der Düngung von Silomais, Zuckerrüben und Grünland ein deutlicher Anstieg zu erkennen ist (Tabelle 53). Im Jahr 2005 ist insgesamt ein Anstieg der Düngung zu verzeichnen. Ein besonderer Anstieg des Düngemiteleinsatzes ist bei der Produktion von Winterraps und Silomais zu sehen.

Tabelle 53: Entwicklung des Düngemiteleinsatzes im Untersuchungsbetrieb 2

Kennwert	2003			2004			2005		
	kg N [ha <sup>-1</sup> ]	kg P [ha <sup>-1</sup> ]	kg K [ha <sup>-1</sup> ]	kg N [ha <sup>-1</sup> ]	kg P [ha <sup>-1</sup> ]	kg K [ha <sup>-1</sup> ]	kg N [ha <sup>-1</sup> ]	kg P [ha <sup>-1</sup> ]	kg K [ha <sup>-1</sup> ]
Winterraps	219	21	134	189	0	100	315	0	100
Wintergerste	177	0	66	135	0	66	135	0	66
Winterweizen	230	0	66	189	0	66	196	0	66
Winterroggen	177	0	83	135	0	66	135	0	66
Sommerweizen	225	0	0	135	0	80	nicht angebaut		
Zuckerrüben	243	34	221	345	88	349	226	94	112
Silomais	275	36	168	447	129	264	415	102	239
Grünland	83	12	150	114	19	132	150	15	103

Die Ermittlung betriebsspezifischer Daten zum Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung erfolgt anhand von REPRO (Tabellen A18 bis A21). Das Grünland im Betrieb wird für die Produktion von Grassilage, Heu und Weidefutter genutzt. Dabei erfolgt die Nutzung von Grassilage- und Heuproduktion überwiegend anhand von zwei Schnitten. Für die Kalkulation des Energieaufwands für das Weidefutter werden die Exkremente der Tiere energetisch mit Null bewertet. Die Berechnungen machen deutlich, dass der Energieaufwand zur Herstellung der wirtschaftseigenen Futtermittel innerhalb der drei Untersuchungsjahre angestiegen ist (Tabelle 54). Gründe dafür sind einerseits der ansteigende Einsatz von Düngemitteln und andererseits die starken Schwankungen der Erträge.

Tabelle 54: Energieintensität für die Herstellung der Futtermittel im Untersuchungsbetrieb 2

Kennwert	Maßeinheit	2003	2004	2005	Mittelwert
Maissilage*	MJ kg <sup>-1</sup> TM	2,37	2,67	2,86	2,49
Wintergerste	MJ kg <sup>-1</sup> TM	2,74	2,11	2,06	2,30
Winterroggen	MJ kg <sup>-1</sup> TM	2,96	2,28	2,47	2,57
Winterweizen	MJ kg <sup>-1</sup> TM	3,60	2,87	2,64	3,04
Winterraps	MJ kg <sup>-1</sup> TM	6,91	4,28	4,27	5,15
Erbsen	MJ kg <sup>-1</sup> TM	2,24	1,27	2,15	1,88
Grassilage**a	MJ kg <sup>-1</sup> TM	0,85	0,49	0,65	1,39
Heu***a	MJ kg <sup>-1</sup> TM	2,25	1,47	2,61	1,71
Weide	MJ kg <sup>-1</sup> TM	0,29	0,47	0,72	0,49

\* inklusive 15 % Verluste (REPRO)

a 2 Schnitte

\*\* inklusive 20 % Verluste (REPRO)

\*\*\* inklusive 30 % Verluste (REPRO)

Die Zusammenstellung der Futterr ration hinsichtlich des Anteils an Kraft- und Grundfutter unterscheidet sich im Untersuchungszeitraum. Durchschnittlich werden 34 % des Futterbedarfs der Milchkühe mit Kraftfutter gedeckt und 66 % mit Grundfutter. Im Jahr 2003 ist der Anteil von Kraftfutter in der Ration am niedrigsten und im Jahr 2004 am höchsten.

Die Energieintensität für den Verfahrensabschnitt Milchgewinnung schwankt im Untersuchungszeitraum zwischen  $0,47 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch im Jahr 2003 und  $0,58 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch im Jahr 2004. Dabei ist deutlich der Zusammenhang zwischen der Milchleistung und dem Energieaufwand zu erkennen. Mit steigender Milchleistung nimmt die Energieintensität pro Kilogramm Milch ab. Zur Milchgewinnung wird ein  $2 \times 8$  Fischgrätenmelkstand eingesetzt. Die Kühlung der Milch erfolgt in einem Kühltank mit Direktkühlverfahren. Die Melkanlage wird mit einer Zirkulationsreinigung gereinigt und es wird eine Wärmerückgewinnung genutzt.

Die Energieintensität für die Verfahrensabschnitte Gebäude und bauliche Anlagen sowie Maschinen und technische Ausrüstung ist entsprechend den ermittelten Daten im Standardverfahren an die Bedingungen des Untersuchungsbetriebes 2 angepasst.

Die Energieintensität für die Herstellung von einem Kilogramm Milch im Untersuchungsbetrieb 2 ist innerhalb der drei untersuchten Jahre angestiegen (Tabelle 55). Begründet ist dies einerseits durch einen ansteigenden Einsatz von Düngemitteln zur Produktion der Futtermittel und ebenfalls durch Ertragsschwankungen. Die Nährstoffbilanz des Betriebes im Bereich Ackerland gibt einen Überschuss an Stickstoffdünger in Höhe von durchschnittlich  $119 \text{ kg N ha}^{-1}$  an. Dabei ist besonders die starke Düngung des Silomais zu erwähnen, welche einen Nährstoffüberschuss von  $203 \text{ kg N ha}^{-1}$  bewirkt. Der Einfluss der hohen Erträge im Pflanzenbau im Jahr 2004 wirkt insgesamt geringer auf die Energieintensität als die in diesem Jahr geringere Milchleistung.

Tabelle 55: Energieintensität im Untersuchungsbetrieb 2 [ $\text{MJ kg}^{-1}$  Milch]

	Maßeinheit	2003	2004	2005	Mittelwert
Futterbereitstellung	$\text{MJ kg}^{-1}$ Milch	1,69	1,71	2,16	1,85
Nachzucht	$\text{MJ kg}^{-1}$ Milch	0,68	0,77	0,82	0,73
Milchgewinnung	$\text{MJ kg}^{-1}$ Milch	0,47	0,58	0,52	0,52
Gebäude und bauliche Anlagen	$\text{MJ kg}^{-1}$ Milch	0,09	0,09	0,09	0,09
Maschinen und technische Ausrüstung	$\text{MJ kg}^{-1}$ Milch	0,41	0,41	0,41	0,41
$\Sigma$ Energieintensität	$\text{MJ kg}^{-1}$ Milch	3,33	3,56	3,99	3,61

#### 4.8.3 Vergleich der Energieintensität der Untersuchungsbetriebe

Für die Untersuchungen in der landwirtschaftlichen Praxis wurden Betriebe mit unterschiedlicher Betriebsgröße betrachtet. Die Hauptproduktionsrichtung beider Untersuchungsbetriebe ist die Milchproduktion. Untersuchungsbetrieb 1 als Familienbetrieb hat eine wesentlich geringere Betriebsgröße und einen wesentlich geringeren Tierbestand als Untersuchungsbetrieb 2, welcher als Agrargenossenschaft wirtschaftet. Untersuchungsbetrieb 1 hat eine durchschnittliche Milchleistung von 8.300 kg Milch pro Kuh und Jahr. Im Untersuchungsbetrieb 2 werden dagegen durchschnittlich 8.900 kg Milch pro Kuh und Jahr erzielt. Das Haltungssystem der Tiere auf den Betrieben sowie das Melksystem sind gleich.

Unterschiedliche Voraussetzungen haben die Betriebe hinsichtlich ihrer Standortbedingungen und den damit zusammenhängenden Erträgen im Pflanzenbau. Untersuchungsbetrieb 2 hat hierbei vorteilhaftere Bedingungen als Untersuchungsbetrieb 1 und ist in Ertragsklasse 2 (Abschnitt 3.4) einzustufen. Wohingegen Untersuchungsbetrieb 1 bei Ertragsklasse 3 (Abschnitt 3.4) einzustufen ist.

Der Vergleich des im Untersuchungszeitraum durchschnittlichen Düngemiteleinsatzes zeigt, dass im Untersuchungsbetrieb 2 der Düngemiteleinsatz insgesamt höher ist als in Untersuchungsbetrieb 1 (Tabelle 56). Für die Grünlandflächen gilt dies allerdings nicht. Während im Untersuchungsbetrieb 1 die Bewirtschaftung der Grünlandflächen intensiv erfolgt, werden im Untersuchungsbetrieb 2 die Grünlandflächen extensiv bewirtschaftet. Ein Vergleich der Grassilageproduktion zeigt, dass dort Untersuchungsbetrieb 1 einen etwa um 50 % höheren Energieeinsatz hat als Untersuchungsbetrieb 2.

Unterschiede bestehen auch in der Futtereinsatzstruktur der Betriebe. Die Futtereinsatzstruktur hat sich über die drei Jahre im Untersuchungsbetrieb 2 dahin entwickelt, dass zunehmend mehr Maissilage und Grassilage als auch Getreide an die Tiere gefüttert wird. Der Anteil des Weidefutters in der Ration ist um 42 % gesunken. Dadurch kommt es zu einem Anstieg des kumulierten Energieaufwands im Betrieb. Auch im Untersuchungsbetrieb 1 hat sich innerhalb des Untersuchungszeitraums die Struktur des Futtereinsatzes geändert. So wurde in den Jahren 2004 und 2006 jeweils ein 5 % höherer Anteil an Kraftfutter in der Ration eingesetzt als im Jahr 2005. Dies hat zu einem Anstieg des kumulierten Energieaufwands geführt. Der Energieaufwand für die Futterbereitstellung im Jahr 2006 ist dennoch etwas höher als 2004. Ursachen dafür sind die in 2006 niedrigeren Erträge der verwendeten Hauptfuttermittel Grassilage und Maissilage und damit der höhere Energieaufwand für die Produktion pro kg TM.

Tabelle 56: Durchschnittlicher Düngemiteleininsatz in den Untersuchungsbetrieben 1 und 2

Kennwert	Untersuchungsbetrieb 1			Untersuchungsbetrieb 2		
	kg N [ha <sup>-1</sup> ]	kg P [ha <sup>-1</sup> ]	kg K [ha <sup>-1</sup> ]	kg N [ha <sup>-1</sup> ]	kg P [ha <sup>-1</sup> ]	kg K [ha <sup>-1</sup> ]
Winterraps	264	36	163	241	7	111
Wintergerste	140	34	58	149	0	66
Winterweizen	132	22	84	205	0	66
Winterroggen	-	-	-	149	0	72
Triticale	117	26	79	-	-	-
Sommerweizen	-	-	-	120	0	127
Zuckerrüben	-	-	-	271	72	228
Silomais	274	35	147	379	89	224
Grünland	147	30	106	115	15	128

Die Berechnungen zur Energieintensität zeigen, dass der Energieaufwand pro Kilogramm Milch im Untersuchungsbetrieb 1 durchschnittlich 9 % höher ist als in Untersuchungsbetrieb 2. Durch die schlechteren Standortbedingungen des Untersuchungsbetriebes 1 ist ein höherer Energieaufwand zur Herstellung der einzelnen Futtermittel bedingt. Dazu kommt, dass Untersuchungsbetrieb 1 im Durchschnitt einen höheren Anteil an Kraftfuttermittel in der Futterration hat, welcher ebenfalls einen Anstieg des Energieaufwands bewirkt. Die um 600 kg pro Kuh und Jahr höhere Milchleistung des Untersuchungsbetriebes 2 hat einen positiven Einfluss auf die Energieintensität bei der Milchproduktion des Betriebes.

Die Energieintensität zur Herstellung eines kg Milch beträgt unter Anwendung der Allokationsmethode "Variante 2.5 - Quartil" 2,24 MJ im Untersuchungsbetrieb 1 und 2,06 MJ kg<sup>-1</sup> Milch im Untersuchungsbetrieb 2. Die Größenordnung des Anteils der einzelnen Produkte am kumulierten Energieaufwand ist in beiden Untersuchungsbetrieben gleich (Tabelle 57).



Tabelle 57: Allokation des kumulierten Energieaufwands der Untersuchungsbetriebe 1 und 2 entsprechend der Allokationsmethode 2.5 - "Quartil" -

Produkte	Maßeinheit	Untersuchungsbetrieb 1				Untersuchungsbetrieb 2			
		Milch	Schlacht-kuh	Kalb	Exkreme-nte	Milch	Schlacht-kuh	Kalb	Exkreme-nte
Futter Milch	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	4.028				3.734			
Futter Schlachtkuh	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>		2.110				1.956		
Futter Kalb	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>			256				237	
Futter Exkreme-nte	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>				6.217				5.763
Futter Fortwärme	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	2.574	1.348	163		2.386	1.250	151	
Futter freigesetztes Methan	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	671	352	43		622	326	40	
Milchgewinnung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	4.316				4.628			
Nachzucht	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	4.026	2.109	256		4.093	2.144	260	
Gebäude und bauliche Anlagen	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	830				801			
Technische Ausrüstung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	548				547			
Maschinen Entmistung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	840				839			
Maschinen Fütterung	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	725	385	45	1.109	724	385	45	1.109
Σ Gesamtenergie	MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	18.558	6.304	763	7.326	18.375	6.060	733	6.871
Anteil am kumulierten Ener- gieaufwand	%	56,32	19,13	2,31	22,23	57,19	18,86	2,28	21,39

## **5 Diskussion**

### **5.1 Energieaufwand und Energieintensität von Milchproduktionsverfahren**

Die Untersuchungen zeigen, dass die Ermittlung des kumulierten Energieaufwands in der Milchviehhaltung von vielen unterschiedlichen Parametern abhängig ist. Die verschiedenen Energieinputs in das Verfahren ermöglichen eine vielseitige Steuerung der Energieeffizienz des Produktionsverfahrens. Entsprechend den durchgeführten Kalkulationen liegt die Energieintensität des definierten Standardverfahrens für die Region Nordost-Deutschland bei  $3,54 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch. Deutlich herausgestellt hat sich der große Anteil des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung am kumulierten Energieaufwand. Zur Einordnung des Ergebnisses und für Vergleiche ist es wichtig, auf eine einheitliche Datenbasis für die Energieäquivalente der aufgewendeten Betriebsmittel und Investitionsgüter zurückzugreifen. Ebenso wichtig ist die Bewertung innerhalb gleicher Systemgrenzen. Anhand der vorgestellten Methode ist die Möglichkeit gegeben, auch Vergleiche einzelner Verfahrensabschnitte vorzunehmen. Als Beispiel ist hierbei der Energieaufwand für die Bereiche Futterbereitstellung sowie Milchgewinnung zu nennen, welche in der Literatur teilweise ausschließlich zur Bestimmung des Energieaufwands für die Milchproduktion genutzt werden. Der Vergleich des Energieaufwands dieser beiden Verfahrensabschnitte entsprechend der Standardration 2 mit Werten aus bisherigen Veröffentlichungen zum kumulierten Energieaufwand der konventionellen Milchproduktion von CEDERBERG & MATTSSON (2000), GRÖNROOS ET AL. (2006), REFSGAARD ET AL. (1998) ergibt, dass die Ergebnisse dieser Arbeit im unteren Bereich wiederzufinden sind. Ursachen für den Unterschied des Energieaufwands im Bereich Futtermittelbereitstellung entstehen bereits durch die Futterstruktur und hängen von den Standortbedingungen ab. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass ein Optimum des kumulierten Energieaufwands bei den Ertragsklassen 2 und 3 zu erkennen ist, wobei sich Ertragsklasse 3 im direkten Vergleich als die Ertragsklasse mit dem geringsten Energieaufwand zeigt. Der Energieaufwand der Ertragsklassen 1 und 4 ist nahezu identisch. Neben dem Bedarf an Energie wird zukünftig auch die Anbaufläche ein begrenzender Faktor in der Futterbereitstellung sein. Daher ist eine gemeinsame Betrachtung beider Kenngrößen zu empfehlen. Die notwendige Futteranbaufläche für die Standardration beträgt bei Futtermitteln, die unter Bedingungen der Ertragsklasse 2 angebaut werden, 1 ha (Tabelle A5). Die Anbaufläche dieser Futtermittel unter Bedingungen der Ertragsklasse 1 ist um 19 % geringer und für Ertragsklasse 3 um 41 % sowie Ertragsklasse 4 um 80 % höher. Eine weitere einflussreiche Größe, die differenzierte Kalkula-

tionsergebnisse bedingt, ist die Milchleistung. Die Zunahme der Milchleistung führt zu einer Verringerung der Energieintensität in der Milchviehhaltung.

Bei der Betrachtung des Energieaufwands der Milchproduktion ist auch die Entstehung von nutzbaren Kuppelprodukten zu beachten. Diese Kuppelprodukte sind mit einem energetischen Wert zu bewerten. So wird die Allokation des Energieaufwands der Milchproduktion auf verschiedene Produkte in der Literatur (CEDERBERG, 1998; CEDERBERG & MATTSSON, 2000; ABEL, 1997; BLONK ET AL., 1997) auf unterschiedliche Art und Weise diskutiert. ABEL (1997) bezieht sich dabei auf einen ökonomischen Verteilungsschlüssel, wie bereits von PROCÉ (1986) empfohlen. Den Produkten Fleisch und Kälber würden demnach 22 % und den Exkrementen 3 bis 8 % des gesamten Energieaufwands als Gutschrift gegeben werden und der restliche Anteil der Milch zugeordnet. Die Allokationsmethode von CEDERBERG (1998) basiert auf den biologischen Beziehungen zwischen Futteraufwand und den Produkten Milch und Fleisch. Dabei entsteht ein Verhältnis des Energieaufwands von 85 % für die Milch und 15 % für Fleisch und Kälber. Die Exkremente werden nicht als Output betrachtet und daher bei der Allokation nicht berücksichtigt. Begründet wird dies durch den Verbleib der Exkremente im Betrieb. Da die Exkremente jedoch als Düngemittel verwendet werden, ist zu empfehlen, diese auch energetisch zu bewerten.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Allokationsmethoden bilden eine Erweiterung zu den bisher genutzten Formen der Allokation des Energieaufwands im Milchproduktionsverfahren.

Unter Anwendung der bevorzugten Allokationsvariante 2.5 "Quartil" wird für das Standardverfahren eine Energieintensität von 2,08 MJ pro kg Milch ermittelt. Dieser Wert ist vergleichbar mit der Energieintensität zur Herstellung von einem Kilogramm Getreide. Kalkulationen zum Energieaufwand für Getreide bspw. von BOCKISCH (2000), REFSGAARD ET AL. (1998) und eigene Kalkulationen ergeben, dass die Energieintensität für die Herstellung von Getreide mit etwa 2,6 MJ pro kg sogar etwas höher ist.

Anders sieht diese Gegenüberstellung jedoch in Bezug des Energieaufwands auf den Nährwert der beiden Produkte aus. Aufgrund des hohen energetischen Nährwertes von Getreide, bspw. für Roggen 13,05 MJ pro kg (QUELLE 8) ergibt sich ein Energieoutput/Energieinput-Verhältnis von 5,02. Hierbei schneidet das Milchproduktionsverfahren mit einem Energieoutput/Energieinput-Verhältnis von 0,82 wesentlich schlechter ab. Zu beachten ist, dass hierbei nur auf den energetischen Wert der Produkte Bezug genommen

wird und weitere ernährungsphysiologisch bedeutende Bestandteile der Produkte keiner Wertung unterzogen werden.

## **5.2 Ergebnisvergleich der Energieintensität zur Milchproduktion zwischen dem theoretischen Standardverfahren und den Untersuchungsbetrieben**

Die Ermittlung der Energieintensität für das Standardverfahren (Abschnitt 4.1), den Untersuchungsbetrieb 1 (Abschnitt 4.9.1) und den Untersuchungsbetrieb 2 (Abschnitt 4.9.2) erfolgte bezogen auf das Hauptprodukt, die Milch. Die Milchleistung der Betriebe unterscheidet sich. Das Standardverfahren hat mit 8.000 kg Milch pro Kuh und Jahr die geringste Milchleistung. Untersuchungsbetrieb 1 liegt mit 8.300 kg Milch pro Kuh und Jahr in der Mitte und Untersuchungsbetrieb 2 hebt sich mit 8.900 kg Milch pro Kuh und Jahr deutlich von den beiden anderen ab. Die Berechnungen erfolgen anhand konkreter Daten aus den Betrieben und für das Standardverfahren durchgeführten Kalkulationen.

Die Energieintensität des Standardverfahrens beträgt  $3,54 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch. Die Energieintensität in den Untersuchungsbetrieben variiert im Untersuchungszeitraum. Im Untersuchungsbetrieb 1 beträgt der Mittelwert der Energieintensität  $3,97 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch und beschreibt eine Differenz von bis zu 17 % innerhalb der drei untersuchten Jahre. Die Schwankungsbreite im Untersuchungsbetrieb 2 beträgt, bezogen auf die Ergebnisse der drei Untersuchungsjahre 20 % und der Mittelwert der Energieintensität ist  $3,61 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch.

Der Anteil der einzelnen Verfahrensabschnitte am kumulierten Energieaufwand der Milch ist in den Untersuchungsbetrieben vergleichbar mit dem des Standardverfahrens. In den drei Produktionsverfahren ist der Anteil an wirtschaftseigenen Futtermitteln in der Futterration hoch. In allen Verfahren werden die Tiere im Sommer halbtags auf der Weide gehalten. Beim Vergleich zwischen dem Standardverfahren und den Untersuchungsbetrieben fällt auf, dass eine Differenz im Bereich des Energieaufwands der Futterbereitstellung besteht. Die Ursache dafür liegt in der unterschiedlichen Produktion der einzelnen Futtermittel. Beispielsweise ist der Energieaufwand zur Produktion von Maissilage beim Untersuchungsbetrieb 1 um etwa ein Viertel und beim Untersuchungsbetrieb 2 um etwa ein Drittel höher als beim Standardverfahren. Ursachen liegen in den unterschiedlichen Standortbedingungen mit den daran geknüpften Ertragsklassen als auch die entsprechende Düngung. Für das Standardverfahren wurde die Ertragsklasse 2 zur Berechnung des kumulierten Energieaufwands herangezogen. Die entsprechenden

Werte zum Energieaufwand der Futtermittelproduktion sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Im Vergleich zum Standardverfahren ist im Untersuchungsbetrieb 2 der Energieaufwand zur Grassilageproduktion um 30 % geringer. Untersuchungsbetrieb 1 hat dagegen einen um 20 % höheren Energieaufwand bei der Grassilageproduktion als das Standardverfahren. Beide Untersuchungsbetriebe haben einen höheren Energieaufwand zur Herstellung des Silomais als im Standardverfahren kalkuliert.

Die Futtereinsatzstruktur des Untersuchungsbetriebes 2 ist direkt mit der des Standardverfahrens vergleichbar. In beiden Verfahren wird ein Anteil von etwa 30 % der benötigten Futtermittel als Kraftfutter vorgelegt und ein Anteil von etwa 70 % als Grundfutter. Untersuchungsbetrieb 1 füttert dagegen mit gleichem Anteil an Kraft- und Grundfutter, also mit einem Einsatz von jeweils 50 %.

Im Verfahrensabschnitt Milchgewinnung ist der Energieaufwand pro Kilogramm Milch beider Untersuchungsbetriebe durchschnittlich 9 % niedriger als im Standardverfahren. Bedingt ist dies durch die höhere Milchleistung in den Untersuchungsbetrieben.

Der Energieaufwand für den Bereich Nachzucht ist im Vergleich der drei Verfahren im Standardverfahren am geringsten und im Untersuchungsbetrieb 1 am höchsten. Ursache dafür sind unter anderem die unterschiedlichen Reproduktionsraten in den Verfahren. So hat der Untersuchungsbetrieb 1 eine Reproduktionsrate von 50 % und das Standardverfahren von 44 %. Der Untersuchungsbetrieb 2 hat mit 36 % zwar die geringste Reproduktionsrate, allerdings ist die Energieintensität aufgrund des höheren Energieaufwands zur Futterbereitstellung höher als im Standardverfahren.

Aufgrund der ähnlichen Stallbauweisen fließt in die Kalkulationen der für das Standardverfahren ermittelte Energieaufwand für Gebäude und bauliche Anlagen ein. Da die Fütterung und Entmistung der Tiere in den Untersuchungsbetrieben entsprechend dem Standardverfahren durchgeführt wird, werden diese Ergebnisse für die Untersuchungsbetriebe lediglich angepasst.

Die Energieintensität des Untersuchungsbetriebes 2 und des Standardverfahrens liegen mit  $3,61 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch beziehungsweise  $3,54 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch sehr dicht beieinander. Untersuchungsbetrieb 1 hat mit durchschnittlich  $3,97 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch eine etwas höhere Energieintensität bei der Produktion von Milch zu verzeichnen. Unterschiede der Energieintensität sind in den Verfahrensabschnitten Futterbereitstellung und Nachzucht zu erkennen (Abbildung 33). Die Kalkulationen zeigen, dass die Energieintensität beider

Untersuchungsbetriebe in dem zur Diskussion vorgestellten energetischen Nachhaltigkeitsbereich von bis zu  $4 \text{ MJ kg}^{-1}$  Milch liegt.

Den größten Anteil am kumulierten Energieaufwand hat in allen Verfahren der Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung mit mehr als 50 %. Deutlich zu erkennen ist, dass neben dem Einfluss der Standortbedingungen besonders das Management des Betriebes hinsichtlich Pflanzenbau, Fütterungsstrategie, Haltungssystem und Nutzungsdauer einen wesentlichen Einfluss auf den kumulierten Energieaufwand ausübt.

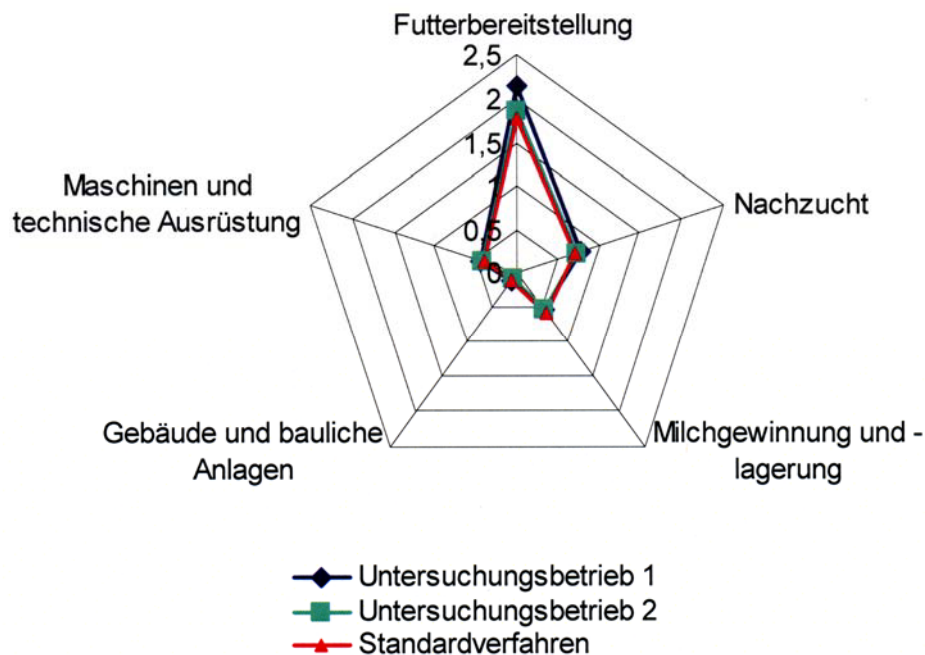


Abbildung 33: Vergleich der Energieintensität [ $\text{MJ kg}^{-1}$  Milch] im Standardverfahren und in den Untersuchungsbetrieben 1 und 2

Zur Bewertung der Energieeffizienz in den Betriebssystemen findet die Einordnung nach den unter Abschnitt 4.7 vorgestellten Indikatoren "Energieintensität Futterbereitstellung", "Energieintensität Nachzucht" und "Energieintensität Milchproduktion" statt. Je höher die Energieintensität für die einzelnen Indikatoren ist, desto intensiver ist an der weiteren Regulierung des Energieaufwands zu arbeiten. Darauf hinzuweisen ist, dass die genannten Diskussionswerte und die dargestellten Bewertungsfunktionen einen orientierenden Charakter haben.

Die Energieintensität des Untersuchungsbetriebs 1 liegt nicht im vorgeschlagenen Diskussionswertebereich für die Futterbereitstellung. Verursacht ist dies einerseits durch den verhältnismäßig hohen Energieaufwand zur Bereitstellung der Futtermittel, aber im Speziellen auch durch die Gestaltung der Futterrational, die einen sehr hohen Anteil an

Kraftfutter enthält. Die Energieintensität des Untersuchungsbetriebs 2 liegt in dem als energetisch nachhaltig definierten Bereich.

Die Energieintensität, bezogen auf die Nachzucht, liegt bei Untersuchungsbetrieb 1 oberhalb des als energetisch nachhaltig definierten Diskussionswertebereichs. Verursacht ist dies durch die hohe Reproduktionsrate in Kombination mit dem hohen Energieaufwand zur Futterbereitstellung. Untersuchungsbetrieb 2 liegt mit seiner Energieintensität, bezogen auf die Nachzucht, an der oberen Grenze des Diskussionswertebereichs und dass trotzdem sich die Reproduktionsrate des Betriebs in dem empfohlenen Wertebereich befindet.

Die Untersuchungen zeigen, dass beide Untersuchungsbetriebe mit einer Energieintensität arbeiten, die unterhalb des vorgeschlagenen Grenzwertes für das Verfahren Milchproduktion liegen (Abbildung 34), auch wenn die Energieintensität in Bezug auf die Futterbereitstellung und Nachzucht teilweise über den dafür empfohlenen Diskussionswerten liegt. Zu beachten ist, dass die Energieintensität des Untersuchungsbetriebs 1 bei dieser Wertung am oberen Grenzbereich liegt. Die Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens im Untersuchungsbetrieb 2 liegt im mittleren Bereich der Diskussionswerte und ist daher als energieeffizienter zu bewerten als die Energieintensität des Untersuchungsbetriebs 1.

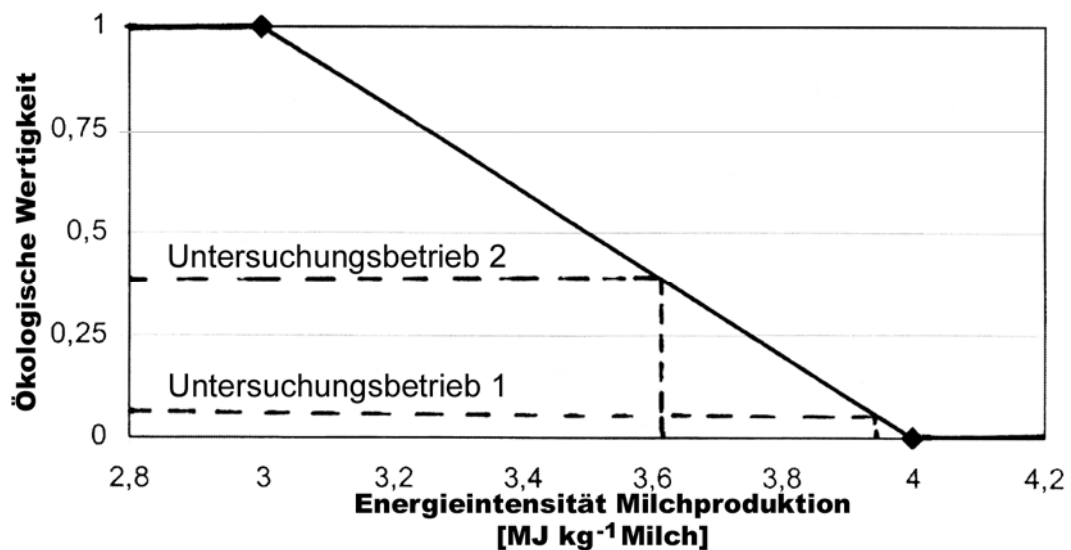


Abbildung 34: Darstellung des Grenzwertbereichs des Indikators Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens für die Untersuchungsbetriebe 1 und 2

Wird bei der Kalkulation der Energieintensität der Untersuchungsbetriebe von der gleichen möglichen Unsicherheit von  $\pm 6\%$  ausgegangen wie beim Standardverfahren (Abschnitt 4.4), so stellt sich bei der Einordnung des Untersuchungsbetriebs 2 keine Verän-

derung dar. Aufgrund der ohnehin im oberen Diskussionswertebereich liegenden Energieintensität des Untersuchungsbetriebs 1 wäre dieser bei einer Unsicherheit der Berechnung von + 6 % als energetisch nicht nachhaltig einzustufen.

Die Anwendung der bevorzugten Allokationsmethode 2.5 "Quartil" in den Untersuchungsbetrieben 1 und 2 bestätigt die anhand des Standardverfahrens durchgeführten Kalkulationen.



## **6 Schlussfolgerungen**

Im landwirtschaftlichen Bereich ist der Verbrauch an Rohstoffen und fossiler Energie aufgrund zunehmender Intensivierung und Mechanisierung der Produktionstechniken gestiegen. Zur Energiebilanzierung in der Tierhaltung ist die Ermittlung des kumulierten Energieaufwands geeignet, da hierbei der direkte und indirekte Energieaufwand berücksichtigt werden.

Aus den Berechnungen zum kumulierten Energieaufwand ist zu erkennen, dass der Verfahrensabschnitt Futterbereitstellung den höchsten Anteil und auch den höchsten Einfluss auf den kumulierten Energieaufwand hat. Bestimmt wird der kumulierte Energieaufwand der Futterbereitstellung durch das Ertragsniveau und das Anbauverfahren. Der niedrigste Energieaufwand zur Futterbereitstellung ist bei einem mittleren Ertragsniveau gegeben. Der Energieaufwand zur Herstellung pro Kilogramm Erntegut von Grünland steigt mit zunehmender Schnitthäufigkeit aufgrund sinkender Erträge pro Schnitt an. Die Rationsgestaltung übt einen entscheidenden Einfluss auf den kumulierten Energieaufwand aus. Mit steigendem Kraftfutteranteil in der Ration erhöht sich der kumulierte Energieaufwand. Ein zunehmender Anteil an Weidefutter in der Ration bewirkt dessen Abnahme.

Zunehmende Milchleistungen des Einzeltiers führen zu einer Verringerung des kumulierten Energieaufwands. Jedoch verringert sich dieser Effekt aufgrund des damit steigenden Kraftfutteranteils in der Futtermischung sowie der steigenden Reproduktionsrate stark.

Aufgrund der Entstehung von Kuppelprodukten im Milchproduktionsverfahren werden mehrere Möglichkeiten zur Allokation des kumulierten Energieaufwands aufgezeigt. Damit wird eine bessere Abbildung der Realität zur Einschätzung des tatsächlichen Energieaufwands pro Einzelprodukt gegeben. Die energetische Bewertung des Kuppelprodukts Exkrement ist angebracht und nicht mit einem Energieaufwand von 0 zu bewerten. Die Allokation des kumulierten Energieaufwands auf das Zielprodukt Milch und die drei Kuppelprodukte Schlachtkuh, Kalb und Exkrement wird anhand der Vorzugsvariante, hier "Quartil" genannt, empfohlen. Diese Allokation zeigt, dass die Herstellung eines Kilogramms Milch mit einem vergleichbaren Energieaufwand verbunden ist, wie die Herstellung eines Kilogramms Getreide.

In den Untersuchungen wird deutlich, dass der Indikator Energieintensität in der Tierhaltung als Driving-Force-Indikator und somit als Teil eines Frühwarnsystems im Hinblick auf die Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktion dienen kann. Zur Bewertung des Energieaufwands des Milchproduktionsverfahrens eignet sich der verfahrensumschließende Indikator Energieintensität. Der Grenzwert von 4 MJ pro kg Milch wird zur Zielwertbestimmung vorgeschlagen und sollte im Sinne einer nachhaltigen Produktion nicht überschritten werden.

Zur detaillierteren Beurteilung der Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens empfiehlt sich die Bewertung einzelner Verfahrensabschnitte. Einer der dafür geeigneten Indikatoren ist die Energieintensität der Futterbereitstellung, für den ein Grenzwert von 2 MJ pro kg Milch vorgeschlagen wird. Als zweiter Indikator bietet sich die Energieintensität des Verfahrensabschnitts Nachzucht an, für welchen ein Grenzwert von 0,7 MJ pro kg Milch zur Diskussion vorgeschlagen wird.

Das Bilanzierungsmodell REPRO hat sich für die Berechnungen zum kumulierten Energieaufwand im Pflanzenbau als geeignetes Werkzeug erwiesen. Es stellt auch für die Beurteilung der Nachhaltigkeit in der Tierhaltung eine gute Grundlage dar. Ergänzungen sind hinsichtlich der Energiebilanzierung für die Bereiche Rationsgestaltung und für die Bereiche Nachzucht, Milchgewinnung und Maschinen in der Tierhaltung zu empfehlen.

Weiterführende Arbeiten mit dem Indikator Energieintensität in der Tierhaltung sollten in Zusammenhang mit ökologischen Indikatoren, welche Umweltauswirkungen beschreiben, sowie sozialen Indikatoren, die beispielsweise den Arbeitskräftebesatz widerspiegeln, und anhand von ökonomischen Indikatoren die Ergebnisse dieser Arbeit ergänzen.

Die Weiterverarbeitung der landwirtschaftlichen Produkte sollte in der Prüfung der Nachhaltigkeit der Nahrungsmittelherstellung unter dem Gesichtspunkt Energieaufwand bewertet werden. Dies umfasst den Weg des Produkts vom Landwirtschaftsbetrieb bis zum verarbeiteten Lebensmittel und sollte bis zur direkten Nutzung des Produkts durch den Verbraucher reichen.

## 7 Zusammenfassung

In vielen Ländern werden im Zuge der Entwicklung von Nachhaltigkeitsindikatoren bereits die Indikatoren Energieaufwand und Energieeffizienz genutzt. Bisherige Arbeiten zum Energieeinsatz in der Tierhaltung sind sektoral angelegt und vernachlässigen somit Wechselwirkungen mit dem Pflanzenbau.

Zielstellung der Arbeit war die Entwicklung einer Methode zur Energiebilanzierung in der Tierhaltung am Beispiel der Milchviehhaltung, welche die Wechselwirkungen zwischen Tierhaltung und Pflanzenbau und Boden berücksichtigen. Diese Methodenentwicklung erfolgt in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4600 zum kumulierten Energieaufwand und schließt sowohl den direkten als auch den indirekten Energieaufwand in die Berechnungen ein. Aufgrund des vorteilhaften Modellansatzes, welcher die Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten Tier - Pflanze - Boden berücksichtigt, wird das Bilanzierungsmodell "REPRO" (REPROduktion der organischen Bodensubstanz) genutzt.

Für Szenariorechnungen wurde ein Standardverfahren zur Energiebilanzierung in der Milchviehhaltung wie folgt definiert: 180 Milchkühe, durchschnittliche Milchleistung von 8.000 kg Milch pro Kuh und Jahr, Liegeboxenlaufstall mit Flüssigentmistung und Halbtagsweidefütterung im Sommer.

Die Berechnungen für das Standardverfahren ergeben, dass die Energieintensität 3,54 MJ pro kg Milch beträgt, sofern der gesamte Energieinput auf das Zielprodukt Milch bezogen wird. Eine steigende Milchleistung bewirkt die Abnahme der Energieintensität. Durch die dazu notwendigen Rationen mit höherem Kraftfutteranteil und die höheren Reproduktionsraten verringert sich dieser Effekt jedoch zunehmend.

In der Milchviehhaltung gibt es Kuppelprodukte. Daher ist die Allokation des kumulierten Energieaufwands der Milchproduktion angebracht. Die bevorzugte Allokation (Variante 2.5, "Quartil") teilt den kumulierten Energieaufwand auf die vier Kuppelprodukte Milch, Schlachtkuh, Kalb und Exkrementen auf. Der Milch wird insgesamt ein Anteil von 59 % des kumulierten Energieaufwands des Verfahrens zugeordnet, den Kuppelprodukten Schlachtkuh ein Anteil von 18 %, dem Kalb ein Anteil von 2 % und den Exkrementen ein Anteil von 21 %.

Der kumulierte Energieaufwand des Standardverfahrens beträgt 28.315 MJ pro Kuh und Jahr und teilt sich wie folgt auf die fünf definierten Verfahrensabschnitte auf:

- Der Energieaufwand des Verfahrensabschnitts Futterbereitstellung hat daran einen Anteil von 50 %. Abhängig ist der Energieaufwand der Futterbereitstellung von den

Standortbedingungen, vom Ertragsniveau und dem Anbauverfahren. Der Energieaufwand ist bei mittleren Ertragsniveaus am geringsten. Einen bedeutenden Einfluss hat auch die Rationsgestaltung. Steigt der Anteil des Kraftfutters in der Ration, nimmt der kumulierte Energieaufwand zu. Mit einem steigenden Anteil an Weidefutter in der Ration nimmt der kumulierte Energieaufwand ab.

- Den zweitgrößten Anteil am kumulierten Energieaufwand der Milchproduktion hat mit 20 % der Verfahrensabschnitt Nachzucht. Die Futterbereitstellung hat den größten Anteil und Einfluss am kumulierten Energieaufwand Nachzucht. Durch eine zunehmende Nutzungsdauer der Milchkühe wird der kumulierte Energieaufwand verringert.
- Der Anteil des Verfahrensabschnitts Milchgewinnung am kumulierten Energieaufwand beträgt 16 %. Der Energieaufwand beim Einsatz eines konventionellen Melksystems ist etwa um 25 % geringer als der eines automatischen Melksystems.
- Der Anteil des Verfahrensabschnitts Maschinen und technische Ausrüstung am kumulierten Energieaufwand des Standardverfahrens beträgt 11 % und wird durch die Rationsgestaltung bestimmt. Mit steigendem Anteil an Weidefütterung in der Ration nimmt der Energieaufwand für die Maschinen in der Tierhaltung ab. Der Energieaufwand für die Maschinen zur Entmistung eines Stallgebäudes mit Festmist ist um 4 % höher als der zur Entmistung eines Stallgebäudes mit Flüssigentmistung.
- Der Verfahrensabschnitt Gebäude und bauliche Anlagen hat mit etwa 3 % einen geringen Anteil und sehr geringen Einfluss am kumulierten Energieaufwand der Milchgewinnung. Der Energieaufwand der Gebäude wird vor allem von der Fußbodengestaltung beeinflusst.

Zur Bewertung der Energiebilanzierung wurde die Ermittlung und Quantifizierung von Fehlern in den Ergebnissen der Sachbilanz anhand von Unsicherheitsanalysen durchgeführt. Der ermittelte Einfluss dieser Unsicherheiten liegt bei  $\pm 6\%$  des kumulierten Energieaufwands des Standardverfahrens. Die Einflüsse dieser Unsicherheiten im Berechnungsverfahren auf den kumulierten Energieaufwand sind geringer als der Einfluss von Verfahrensänderungen durch betriebs- und managementbedingte Entscheidungen. Aufbauend auf die Untersuchungen zum kumulierten Energieaufwand erfolgte die Entwicklung geeigneter Indikatoren, die die Nachhaltigkeit des Energieeinsatzes im Milchproduktionsverfahren beschreiben. Neben einem verfahrensumschließenden Indikator, die Energieintensität für das Milchproduktionsverfahren, werden zwei weitere Indikatoren vorgeschlagen, welche die Beurteilung einzelner Verfahrensabschnitte ermöglichen:

Energieintensität Futterbereitstellung und Energieintensität Nachzucht. Für den Indikator Energieintensität des Milchproduktionsverfahrens ist ein Grenzwert von 4 MJ pro kg Milch empfohlen, welcher nicht überschritten werden sollte. Der zur Diskussion vorgeschlagene Grenzwert für den Indikator Energieintensität Futterbereitstellung liegt bei 2 MJ pro kg Milch und für den Indikator Energieintensität Nachzucht bei 0,7 MJ pro kg Milch. Die Energieintensität in der Tierhaltung eignet sich als weiterer Baustein eines Indikatorensystems zur Prüfung der Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktion. Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit im Agrarbereich kommt der Ebene des Landwirtschaftsbetriebs besondere Bedeutung zu. Die diesbezüglich durchgeführten Untersuchungen zur Energieintensität für zwei Praxisbetriebe bestätigen die Ergebnisse der Kalkulationen. Allerdings ist eine umfangreichere Prüfung des Energieaufwands von Praxisbetrieben notwendig, um eine breitere Datenbasis zur Validierung der Methode insbesondere für die Ableitung von Indikatoren und Zielwerten zu ermöglichen.

## 8 Summary

Agriculture production has had a constant growth of raw materials and fossil energy consumption due to the intensification and mechanisation of production technologies. Energy efficiency is one of the key indicators for developing more sustainable agricultural practices.

The objectives of this research were to contribute to the development of a method for a generally accepted way of balancing energy in livestock husbandry, and to calculate energy demand using dairy farming as an example. In this regard, not only inputs and outputs are regarded in the form of a "black box" analysis, but also the relationships between livestock husbandry and the farm level soil and plants, via internal energy and mass fluctuations.

For a detailed description of the energy demand in dairy farming a method is developed that enables the assessment of single sections of the procedure. The energy inputs in livestock husbandry are assessed on the basis of direct and indirect energy consumption according to the VDI-guideline 4600 to the cumulative energy demand. The methodology will be integrated into the farm and environmental management system REPRO (REPROduction of organic soil matter). The REPRO software analyses and evaluates environmental impacts. For scenario estimates a standard technology has been defined: a cubicle housing system for 180 dairy cows and liquid manure disposal, the feeding of total mixed rations, half-day grazing in the summer, a milk yield of 8,000 kg milk per cow in a year.

For the standard procedure, an energy intensity of 3.54 kg of milk is calculated, if the cumulative energy demand of the procedure relates on the milk as target product. Co-products are developed from dairy farming. Within the scope of a life cycle inventory analysis the allocation of the cumulative energy demand of dairy farming was done. In this context the allocation is to emphasize which divides the cumulative energy demand by the four co-products milk, beef cow, calf and excrements. Using this method, the milk has a share of 59 % of the cumulative energy demand of the procedure, the co-products beef cow a share of 18 %, the calf a share of 2 % and the excrements a share of 21 %.

The cumulative energy demand of the standard technology amounts to 28,315 MJ per cow in a year and is described in the following five procedure sections hereafter:

- The investigations show that the cumulative energy demand in dairy farming is significantly influenced by feed supply. The feed supply has a share of 50 % on the

cumulative energy demand in dairy farming. The energy demand depends on the site conditions, the yields and the cultural method. In addition the cumulative energy demand is strongly affected by the composition of the diet. Increasing pasture in the diet decreases the cumulative energy demand while concentrate in the diet has a reverse effect.

- The procedure section replacement, which relates on the breeding of the heifer in dairy farming, has a share of 20 % on the cumulative energy demand in dairy farming. The feed supply requires the main share of the cumulative energy demand for the replacement. With an increasing service life of the cows the cumulative energy demand of the procedure section replacement decreases.
- The share of the procedure section milking on the cumulative energy demand is 16 %. Automatic milking systems averages 25 % higher electrical energy consumption compared to conventional milking systems.
- The procedure section machines and technical facilities has a share of 11 % on the cumulative energy demand of the standard technology and relates on the composition of the diet. Increasing portion in pasture in the diet causes a decrease of the energy demand for the machines in livestock husbandry. The energy demand for machines for the manure disposal of livestock buildings with solid manure disposal is about 4 % higher than for the disposal of livestock buildings with liquid manure disposal.
- The livestock buildings and storages have a share of 3 % on the cumulative energy demand and its influence is marginal. The design of the floor has a stronger influence on the cumulative energy demand of the buildings than the building shell.

An analysis was done to ascertain and quantify the uncertainty which is introduced into the results of the life cycle inventory analysis. As result of the analysis a deviation of  $\pm 6$  % of the cumulative energy demand of the standard technology was calculated. This uncertainty of the calculation has a lower influence on the cumulative energy demand than management related decisions on the cultural practices.

Energy intensity indicators for dairy farming were developed in relation with the investigations of the cumulative energy demand. A procedure surrounding indicator, the energy intensity for dairy farming is suggested with a limit of 4 MJ per kg milk which should not be exceeded. Two more indicators are suggested: 2 MJ and 0.7 MJ per kg milk for the energy intensity for feed supply and energy intensity of replacement, re-

spectively. Energy intensity in livestock husbandry is an useful part of an indicator system for the examination of the sustainability of agricultural production procedures.

The farm has a special importance during the assessment of the sustainability in agriculture. Investigations concerning the energy intensity at two farms confirm the results of the calculations. More extensive research concerning the energy demand at farms is necessary to get a broad basis of data to validate the method especially for the deduction of indicators and target values.



## 9 Literaturverzeichnis

- Abel, H. J. (1997): Stoff- und Energiebilanzen in der Tierproduktion. Kongressband des 109. VD-LUFA. [33-50](#).
- Allen, P.; van Dusen, D.; Lundy, J. und S. Gliessmann (1991): Expanding the definition of sustainable agriculture. Journal of Alternative Agriculture, [6](#), pp. [34-39](#).
- Andreoli, M. und V. Tellerini (2000): Farm sustainability evaluation: methodology and practice. Agriculture Ecosystems & Environment, [77](#), [43-52](#).
- Appl, M. (1997): Modern production technologies - a review. In: Nitrogen - The Journal of the World Nitrogen and Methanol Industries, pp. [4-56](#).
- Baccini, P. und H.-P. Bader (1996): Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung. Spektrum, Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Oxford.
- Berg, M.; Eisele, J.; und L. Schulze-Pals (2002): Umweltindikatoren als Element agrarpolitischer Maßnahmen. AGRA-EUROPE, [48/02](#): Sonderbeilage.
- Berg, M.; Eisele, J. und L. Schulze-Pals (2003): Umweltindikatoren als Element agrarpolitischer Maßnahmen - Möglichkeiten und Grenzen aus Sicht der Administration. In: Dachverband Agrarforschung: Umweltindikatoren - Schlüssel für eine umweltverträgliche Land- und Forstwirtschaft. Dachverband Agrarforschung, Schriftenreihe Agrarspektrum [36](#), VerlagsUnion Agrar, [S. 85-96](#).
- Berg, W. und H. J. Hellebrand (2000): Criteria for the Development and Assessment of Agricultural Procedures in Animal Production. AgEng 2000. University of Warwick, UK, [proceedings part 1](#), pp. [120-121](#).
- Berg, W. und V. Scholz (2000): Energieaufwand und Kosten für Verfahren der Tierhaltung. Landtechnik [2/2000](#), 55. Jahrgang, [S. 172-173](#).
- BfN (Bundesamt für Naturschutz) (1999): Daten zur Natur. Landwirtschaftsverlag Münster.
- BfN (Bundesamt für Naturschutz) (2002): Daten zur Natur. Landwirtschaftsverlag Münster.
- Biermann, S.; Rathke, G. W.; Hülsbergen, K. J. und W. Diepenbrock (1999): Energy recovery by crops in dependence on the input of mineral fertilizer. Agroecological Institute and Institute of Agronomy and Crop Science, Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, Halle (Saale).
- Blonk H.; Lafleur, M. und van H. Zeijts (1997): Screening LCA on Milkpowder. Appendix 3 of the report: Towards an environmental information infrastructure for the Dutch food industry. IVAM Environmental Research, P. O. Box 18180, 1001 ZB Amsterdam.

- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2000): Erprobung der CSD-Nachhaltigkeitsindikatoren in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Bockisch, F. J. (Hrsg.) (2000): Bewertung von Verfahren der ökologischen und konventionellen landwirtschaftlichen Produktion im Hinblick auf den Energieeinsatz und bestimmte Schadgasemissionen. Studie als Sondergutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn; Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 211, Braunschweig.
- Bockmann, O. C.; Kaarstad, O.; Lie, O. H. und I. Richards (1991): Energieverbrauch in der Landwirtschaft. In: Bonner Arbeitskreis Klimawandel (Hrsg.) 2001: Klimawandel. Ursachen, Folgen und Handlungsmöglichkeiten. S. 177-183.
- Bockstaller, C.; Girardin, P. und H. M. G. van der Werf (1997): Use of agro-ecological indicators for evaluation of farming systems. European Journal of Agronomy (7), pp. 261-270.
- Boor, P.; Straub, R. J.; Holmes, B. J. und R. Stowell (1988): Electrical energy end-use on Wisconsin dairies. International Winter Meeting for ASAE, 13.-16. Dez., Hyatt Regency, Chicago, Illinois.
- Brundtland-Kommission (1987): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Eggenkamp, Greven.
- Brunsch, R.; Eichler, F. und O. Kaufmann (1999): Das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung. Bornimer Agrartechnische Berichte 22 (Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung), S. 15-20.
- BStBl (Bundessteuerblatt) (1996): Absetzung für Abnutzung (AfA) (1996): Nr. 2 der Tabellenliste; AfA-Tabelle Landwirtschaft und Tierzucht, S. 1416.
- Büscher, W. (2003): Haltungsverfahren und Stallsysteme. In: Fahr, R.-D. und G. von Lengerken: Milcherzeugung - Grundlagen, Prozesse, Qualitätssicherung. Deutscher Fachverlag GmbH, Frankfurt am Main, ISBN 3-87150-726-1. S. 204-212.
- Cederberg, Ch. (1998): Life Cycle Assessment of Milk Production - A Comparison of Conventional and Organic Farming. SIK-Rapport 1998, Nr. 643, Gothenburg, ISBN 91-7290-189-6.
- Cederberg, Ch. und B. Mattsson (2000): Life cycle assessment of milk production - a comparison of conventional and organic farming. Journal of Cleaner Production, 8, pp. 49-60.
- Christen, O. (1996): Nachhaltige Landwirtschaft ("Sustainable Agriculture"). Ideengeschichte, Inhalte und Konsequenzen für Forschung, Lehre und Beratung. Ber. Ldw. 74, S. 66-86.
- Christen, O.; Hülsbergen, K.-J. und W. Heyer (2002): Umweltindikatoren als Element agrarpolitischer Maßnahmen - Möglichkeiten und Grenzen aus der Sicht der pflanzlichen Produktion. agrar spectrum, 36, S. 79-85.

- Christen, O. und Z. O'Halloran-Wietholtz (2002): Indikatoren für eine nachhaltige Entwicklung der Landwirtschaft. Institut für Landwirtschaft und Umwelt. Bonn.
- Clausen, N. (2000): Analyse des Elektroenergieverbrauchs und Konzeption energetisch und verfahrenstechnisch optimierter Lösungen für die Milchvieh- und Schweinehaltung. Forschungsbericht Agrartechnik 351, VDI-MEG, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Clausen, N. (2001): Elektrischer Leistungs- und Energiebedarf bei verschiedenen Verfahren der Milchgewinnung in unterschiedlichen Betriebsgrößen. (Electrical energy demand for different processes of milking for different farm sizes.) In: Proc. 5th International Conference: Construction, Engineering and Environment in Livestock Farming, Stuttgart, Universität Hohenheim, S. 170-175.
- Costanza, R. und B. C. Patten (1995): Defining and predicting sustainability. Ecological Economics, 15, pp. 193-196.
- de Haes, U. H. A. und G. R. de Snoo (1996): Environmental Certification; Companies and Products: Two Vehicles for a Life Cycle Approach. Int. J. LCA 1 (3), pp. 168-170.
- de Koning, K.; Verstappen-Boerekamp, J. und E. Schuiling (2002): Milk cooling systems for automatic milking. 1<sup>st</sup> North American Conference on Robotic Milking, pp. 25-36, Wageningen, The Netherlands.
- DLG (Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft) (1997): Futterwerttabellen - Wiederkäuer. Hrsg.: Universität Hohenheim, 7. erw. und überarbeitete Aufl., Frankfurt am Main, DLG-Verlag, ISBN 3-7690-05473.
- Eckert, H. und G. Breitschuh (1994): Kritische Umweltbelastungen (KUL) - Eine Methode zur Analyse und Bewertung der ökologischen Situation von Landwirtschaftsbetrieben. Arch. Acker-Pfl.-Boden 38, S. 149-163.
- Eckert, H. und G. Breitschuh (1997): Kritische Umweltbelastungen (KUL) - Ein Verfahren zur Erfassung und Bewertung landwirtschaftlicher Umweltwirkungen. In: Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Umweltverträgliche Pflanzenproduktion - Indikatoren, Bilanzierungsansätze und ihre Einbindung in Ökobilanzen. Zeller Verlag, Osnabrück, S. 185-197.
- Eckert, H. und U. Gernand (2000): Praktische Erfahrungen mit der Umweltverträglichkeitsbewertung KUL - Ergebnisse und Schlussfolgerungen. VDLUFA-Schriftenreihe 53.
- Eckert, H.; Breitschuh, G. und D. Sauerbeck (1999): Kriterien umweltverträglicher Landbewirtschaftung (KUL) - ein Verfahren zur ökologischen Bewertung von Landwirtschaftsbetrieben. Agribiol. Res. 52, 1.
- Edens, W. C.; Pordesimo, L. O.; Wilhelm, L. R. und R. T. Burns (2003): Energy use analysis of major milking center components at a dairy experiment station. Applied Eng. in Agric. 19, pp. 711-716.

- Edwards, C. A.; Grove, T. L.; Harwood, R. R. und C. J. Pierce Colfer (1993): The role of agroecology and intergrated farming systems in agricultural sustainability. *Agriculture Ecosystems & Environment* 46, pp. 99-121.
- EFMA (2000): Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry. Booklet No. 1, Production of Ammonia, Booklet No. 2, Production of Nitric Acid, Booklet No. 5, Production of Urea and Urea Ammonium Nitrate and Booklet No. 6, Production of Ammonium Nitrate. Brussels: European Fertilizer Manufacturers Association.
- Ekvall, T. (1999): System Expansion and Allocation in Life Cycle Assessment with Implications for Wastepaper Management. Ph. D. thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
- EU-Parlament (2001): Der Ökologische Fußabdruck. Optionsbrief und Zusammenfassung, Scientific and Technological Options Assessment (STOA), PE Nr. 297, S. 571.
- Fahr, R.-D. und G. von Lengerken (2003): Milcherzeugung - Grundlagen, Prozesse, Qualitätssicherung. Deutscher Fachverlag GmbH, Frankfurt am Main, ISBN 3-87150-726-1.
- Farmer, G. S.; Ludington, D. C. und R. A. Pellerin (1990): A review of electricity use and the impact of selected demand-side management technologies on dairy farms. ASAE Paper No. 903566, S. Joseph, Mich.
- Flachowsky, G. und W. Brade (2007): Potenziale zur Reduzierung der Methan-Emissionen bei Wiederkäuern. *Züchtungskunde* 79 (6), S. 417-465.
- Fluck, R. C. (1992): Fundamentals of energy analysis for agriculture. ASAE Publication 3-81, pp. 208-211, ASAE, St. Joseph, MI .
- FNR (2007): Biogas-Basisdaten Deutschland. Hrsg. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffen e. V. (FNR), Gülzow.  
[http://big-east.eu/downloads/FNR\\_basisdaten\\_biogas\\_2007.pdf](http://big-east.eu/downloads/FNR_basisdaten_biogas_2007.pdf)
- Freyer, B.; Reisner, Y. und D. Zuberbühler (2000): Potential impact model to assess agricultural pressure to landscape ecological functions. *Ecological Modelling* 130, pp. 121-129.
- Frischknecht, R. (2000): Allocation in Life Cycle Inventory Analysis for Joint Production. *Int. J. LCA* 5 (2), pp. 1-11 (The MIIM Ph. D. Club).
- Fürst, O. und H. Klemmstedt (1997): Umweltbewertung. In: Fränzle, O.; Müller, F. und W. Schröder (Hrsg.): *Handbuch der Umweltwissenschaften*. Ecomed Verlagsgesellschaft Landsberg am Lech, VI-3-4, S. 3-13.
- Gartung, J. und G. Beyersdorfer (2000): Zukunftsweisende Stallanlagen für die Milchviehhaltung. In: KTBL-Schrift 397: Zukunftsweisende Stallanlagen im Außenbereich. Münster, KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH, ISBN 3-7843-2122-4.

- Geier, U.; Meudt, M.; Rudloff, B.; Urfei, G. und H.-P. Schick (1999): Entwicklung von Parametern und Kriterien als Grundlage zur Bewertung ökologischer Leistungen und Lasten der Landwirtschaft - Indikatorensysteme. Umweltbundesamt.
- GEMIS (Global Emission Model for Integrated Systems) (2006): Version 4.3. Öko-Institut Freiburg i. Br. (Institut für angewandte Ökologie e.V.). <http://www.oeko.de/service/gemis/> (März, 2006).
- Girardin, P.; Bockstaller, C. und H. M. G. van der Werf (1996): Evaluation of the sustainability of farm by means of indicators. In: Behl: Resource Management in Fragile Environments. Hisar & MMB, New Delhi, pp. 280-296.
- Grönroos, J.; Seppälä, J.; Voutilainen, P.; Sewi, P. und K. Koikkalainen (2006): Energy use in conventional and organic milk and rye bread production in Finland. Agriculture Ecosystems & Environment, volume 117, issues 2-3, pp. 109-118.
- Gutsche, V. (1997): Pflanzenschutzbezogene Indikatoren einer nachhaltigen Landwirtschaft - Probleme und Lösungsansätze. In: Umweltverträgliche Pflanzenproduktion - Indikatoren, Bilanzierungsansätze und ihre Einbindung in Ökobilanzen, DBU, S. 101-115.
- Haas, G.; Geier, U.; Schulz, D. G. und U. Köpke (1995): Vergleich konventioneller und organischer Landbau - Teil I: Klimarelevante Kohlendioxid-Emission durch den Verbrauch fossiler Energie. Ber. Ldw., 73, S. 401-415.
- Haas, G. und U. Köpke (1994): Vergleich der Klimarelevanz ökologischer und konventioneller Landbewirtschaftung. In: Enquete-Kommission. Schutz der Erdatmosphäre des Deutschen Bundestages, Band 1, Landwirtschaft, Teilband 2, Studie H. Economica Verlag GmbH, Bonn.
- Hansen, J. W. und J. W. Jones (1996): A System Framework for Characterizing Farm Sustainability. Agricultural Systems 51, pp. 185-201.
- Heißenhuber, A. (2000): Nachhaltige Landwirtschaft - Anforderungen und Kriterien aus wirtschaftlicher Sicht. VDLUFA-Schriftenreihe 55, 1, S. 72-82.
- Heseker, B. und H. Heseker (2007): Nährstoffe in Lebensmitteln - Die große Energie- und Nährwerttabelle. 3. Auflage Ernährungsumschau, Umschau Zeitschriftenverlag, Taunus.
- Heyland, K.-U. (1998): Zur Methodik einer integrierten Darstellung und Bewertung der Produktionsverfahren im Pflanzenbau. German Journal of Agronomy 2, S. 145-159.
- Huggins, L. F. (1991): Analysis and Interpretation. In: Instrumentation and Measurement for Environmental Sciences. Editors: Z. A. Henry, G. C. Zoerb und G. S. Birth, Third Edition, American Society of Agricultural Engineers, Michigan, USA.

- Hülsbergen, K.-J. (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Shaker-Verlag, Aachen, zugl. Halle, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Habil.-schrift, 2002, ISBN 3-8322-1464-X.
- Hülsbergen, K.-J.; Diepenbrock, W. und D. Rost (2000): Analyse und Bewertung von Umweltwirkungen im Landwirtschaftsbetrieb - Das Hallesche Konzept -. Die Agrarwissenschaften im Übergang zum 21. Jahrhundert - Herausforderungen und Perspektiven. 8. Hochschultagung am 28.4.2000 in Halle/Saale, Landwirtschaftliche Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle/Saale.
- Huppes, G. (1994): A general method for allocation in LCA. In: Proceedings of the European Workshop on allocation in LCA, edited by G. Huppes and F. Schneider. Centre of Environmental Sciences of Leiden University CML, Leiden, February 24-25, pp. 74-90.
- ISO 14040 (1997): Umweltmanagement Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen. DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag GmbH, Berlin.
- ISO 14041 (1998): Umweltmanagement Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz. DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag GmbH, Berlin.
- Jäkel, K. (2003): Analyse der Elektroenergieverwendung und Einsparpotentiale am Beispiel sächsischer Milchviehanlagen. (Analysis of the electrical energy input and saving potentials at the example of Saxon dairy farms.) Forschungsbericht Agrartechnik 414, Institut für Agrartechnik und Landeskultur der Landwirtschaftlichen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Käding, H. (2006): Effect of varied fertilization and cutting frequency on forage yields, phosphorus and potassium contents and nutrient balance of fen grassland. Archives of Agronomy and Soil Science, Taylor & Francis Group, June 2006, Vol. 52, Number 3, pp. 261-267.
- Käding, H.; Kaiser, T. und A. Werner (2005): Model for calculating grassland yields and forage quality in North-East Germany on the basis of site and management characteristics. Archives of Agronomy and Soil Science, 51 (4), pp. 417-431.
- Kaliski, O. (2003): Externe Kosten der Landwirtschaft - Vergleichende Analyse zwischen konventionellem und biologischem Anbausystem anhand von Treibhausgasemissionen. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Kalk, W.-D. und K. J. Hülsbergen (1996a): Methodik zur Einbeziehung des indirekten Energieverbrauchs mit Investitionsgütern in Energiebilanzen von Landwirtschaftsbetrieben. Kühn-Archiv 90, S. 41-56, Münster-Hiltrup. Landwirtschaftsverlag, ISSN: 0940-3507.
- Kalk, W.-D. and K. J. Hülsbergen (1996b): Energiebilanz-Methode und Anwendung als Agrar-Umweltindikator. DBU, Wittenberg.



- Kaltschmitt, M. und A. Reinhardt (1997): *Nachwachsende Energieträger. Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung.* Vieweg-Verlag Braunschweig/Wiesbaden.
- Kelm, M. (2003): *Strategies for sustainable agriculture with particular regard to productivity and fossil energy use in forage production and organic arable farming.* Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- Kim, S. und B. E. Dale (2004): *Cumulative Energy and Global Warming Impact from the Production of Biomass for Biobased Products.* Journal of Industrial Ecology, pp. 146-162.
- Kim, S. und M. Overcash (2000): *Allocation Procedure in Multi-Output Process: An Illustration of ISO 14041.* Int. J. LCA 5 (4), pp. 221-228.
- Kirchgeßner, M. (1997): *Tierernährung: Leitfaden für Studium, Beratung und Praxis. 10. neubearb. Aufl.* - BLV-Verl.-Ges. München. DLG-Verl. Frankfurt (Main), ISBN 3-7690-0549-X.
- Kirchgeßner, M. (2004): *Tierernährung. 11. neu überarbeitete Auflage.* DLG-Verlags-GmbH Frankfurt (Main), ISBN 3-7690-0594-5, 608 Seiten.
- KOMM (Kommission der Europäischen Gemeinschaften) (2000). *Indikatoren für die Integration von Umweltbelangen in die Gemeinsame Agrarpolitik.* Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament vom 26.1.2000, 20, endgültig.
- KOMM (Kommission der Europäischen Gemeinschaften) (2001): *Statistischer Informationsbedarf für Indikatoren zur Überwachung der Integration von Umweltbelangen in die Gemeinsame Agrarpolitik.* Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament vom 20.3.2001, 144, endgültig.
- KOMM (Kommission der Europäischen Gemeinschaften) und EUROSTAT (2002): *Weiterverfolgung von KOMM (2001) 144 - Statistische Informationen, die zur Auswertung von Indikatoren über die Integration von Umweltanliegen in die gemeinsame Agrarpolitik benötigt werden.* Dok. AEI/07 der Arbeitsgruppe "Agrarumweltindikatoren".
- Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung (1992): *Agenda 21, Rio de Janeiro.* www.agrar.de/agenda/agd21k00.htm
- Kunz, H.-J. (1999): *Kälberaufzucht.* Calf rearing. Betriebswirtschaftliche Mitteilungen, Nr. 526/527.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (2005): *Automatisches Melken in Milchviehställen.* (Automatic milking in dairy cattle houses.), KTBL-Schrift 430, Darmstadt.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (2006): *Betriebsplanung Landwirtschaft 2006/07.* Darmstadt.

- Lenz, R.; Malkina-Pykh, I. G. und Y. Pykh (2000): Introduction and overview (INDEX workshop on Environmental Indicators and Indices). *Ecological Modelling* **130**, pp. 1-11.
- Lewis, A. und J. A. Tatchell (1979): Energy in UK Agriculture. *Journal of Science Food Agriculture*, pp. 449-457.
- Lewis, A. und K. S. Bardon (1998): A computer-based informal environmental system for agriculture. *Environmental Modelling & Software* **13**, pp. 123-137.
- Lindfors, L.-G.; Christiansen, K.; Hoffmann, L.; Virtanen, Y.; Juntilla, V.; Hanssen, O.-J.; Rønning, A.; Ekvall, T. und G. Finnveden (1995): Allocation, Technical Report No. 7. In: Lindfors, L.-G.; Christiansen, K.; Hoffmann, L.; Virtanen, Y.; Juntilla, V.; Leskinen, A.; Hanssen, O.-J.; Rønning, A.; Ekvall, T.; Finnveden, G.: *LCA-Nordic, Technical Reports No 1-9*, Nordic Council of Ministers, Tema Nord, p. 502, Copenhagen.
- LKV (Landeskontrollverband Brandenburg e. V. Waldsiedersdorf) (2006): Jahresbericht 2006 - Stand der Arbeiten, Ergebnisse und Entwicklung. [www.lkvbb.de](http://www.lkvbb.de).
- LKV (Landeskontrollverband Brandenburg e. V. Waldsiedersdorf) (2007): Jahresbericht 2007 - Stand der Arbeiten, Ergebnisse und Entwicklung. [www.lkvbb.de](http://www.lkvbb.de).
- Lünzer, I. (1997): Energiebilanzen in der konventionellen und ökologischen Landwirtschaft. *VDLUFA-Schriftenreihe* **46**, S. 463-466.
- Lütke Entrup, N. (1999): Agenda 21 - Nachhaltige Entwicklung und intensive Landwirtschaft sind kein Widerspruch.
- LVLf - Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung des Landes Brandenburg (2005): Datensammlung für die Betriebsplanung und betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg. 4. überarbeitete Auflage. <http://www.mluv.brandenburg.de/cms/detail.php/lbm1.c.198303.de> (Mai 2006).
- MAFF (Ministry of Agriculture, Fisheries and Food/UK) (2000): Towards sustainable agriculture - a pilot set of indicators. [www.detr.gov.uk](http://www.detr.gov.uk).
- McRae, T.; Smith, C. A. S. und I. J. Gregorich (2000): Environmental sustainability of Canadian agriculture - Report of the agri-environmental indicator project. Agriculture an Agri-Food Canada, Ottawa.
- Mills, J. A. N.; Dijkstra, J.; Bannink, A.; Cammell, S. B.; Kebreab, E. und J. France (2001): A mechanistic model of whole-tract digestion and methanogenesis in the lactating dairy cow: model development and evaluation, and application. *J. Anim. Sci.* **79**, pp. 1584-1597.
- Mitchell, G.; May, A. und A. McDonald (1995): PICABUE: A methodological framework for the development of indicators of sustainable development. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* **2**, West Yorkshire, pp. 104-123.



- Münchhausen, H. von und H. Nieberg (1997): Agrar-Umweltindikatoren: Grundlagen, Verwendungsmöglichkeiten und Ergebnisse einer Expertenbefragung. In: W. Diepenbrock, M. Kaltschmitt (1997): Umweltverträgliche Pflanzenproduktion - Indikatoren, Bilanzierungsansätze und ihre Einbindung in Ökobilanzen. Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Initiativen zum Umweltschutz 5, Zeller, Osnabrück, S. 13-19.
- Nehring, W. (2002): Umweltindikatoren im betrieblichen Agrar-Umweltmanagement - Erfahrungen und Anregungen aus der landwirtschaftlichen Praxis. agrar spectrum 36, S. 63-79.
- OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development) (1997): Environmental Indicators for Agriculture. Paris.
- OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development) (2001): Environmental Indicators for Agriculture - Methods and Results. Vol. 3, Paris.
- Oheimb, R.; v. Ponath, J.; Prothmann, G.; Sergeois, C.; Werschnitzky, U. und H. Willer (1987): Energie und Agrarwirtschaft. Direkter und indirekter Energieeinsatz im agrarischen Erzeugerbereich in der Bundesrepublik Deutschland. Hrsg.; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Münster-Hiltrup, KTBL-Schrift 320.
- Ordolff, D. (1997): Melkstände - ein Vergleich. Aid 1347/1997, Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (aid) e.V., Bonn, ISBN 3-89661-384-7.
- Pache, S. (2002): Managementunterlagen zur Milch- und Färsenproduktion. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 3. überarbeitete Auflage, 20. Feb., S. 50-63.
- Patyk, A. und G. A. Reinhardt (1997): Düngemittel-, Energie- und Stoffstrombilanzen. Wiesbaden, Vieweg-Verlag.
- Peebles, R. W.; Reinemann, D. J. und R. J. Straub (1994): Analysis of milking center energy use. Applied Eng. in Agric. 10 (6), pp. 831-839.
- Pimentel, D. (1992): Energy Inputs in Production Agriculture. In: Fluck, R. C.: Energy in Farm Production, p. 20, Elsevier Science Publishers B. V.
- Pimentel, D.; Hurd, L. E.; Bellotti, A. C.; Forster, M. J.; Oka, I. N.; Sholes, O. D. und R. J. Whitman (1973): Food Production and the Energy Crisis. Science 182, pp. 443-449.
- Pinstrup-Andersen, P. (1999): Towards Ecologically Sustainable World Food Production. Industry and Environment, United Nations Environment Programme 22, pp. 10-13, Paris.
- Piörr, H. P. (1998): Zur Entwicklung eines Rahmenwerkes von Indikatoren zur Analyse von Agrarlandschaften. Bornimer Agrartechnische Berichte, 21, S. 70-76.

- Procé, C. (1986): Energieverbrauch in de Nederlandse akkerbouw en veehouderij. IVEM-rapport nr. 17 [99]. Interfacultaire Vakgroep Energie en Milieukunde Rijksuniversiteit Groningen.
- Refsgaard, K. N.; Halberg, N. und E. S. Kristensen (1998): Energy Utilization in Crop and Dairy Production in Organic and Conventional Livestock Production Systems. *Agricultural Systems*, 57, pp. 599-630.
- Reid, D. (1986): The effects of frequency of cutting and nitrogen application rates on the yields from perennial ryegrass plus white clover swards. *Journal of Agricultural Science, Cambridge University Press*, Volume 107, Number 3, pp. 687-696.
- Reitmayr, T. (1995): Entwicklung eines rechnergestützten Kennzahlensystems zur ökonomischen und ökologischen Beurteilung von agrarischen Bewirtschaftungsformen - dargestellt an einem Beispiel. Sonderheft *Agrarwirtschaft* 147, S. 302, TU München.
- Rennings, K. (1994): Indikatoren für eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung. In: Rat von Rossing, W. A. H., J. M. Meynard, and M. K. van Ittersum. *Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: case studies from France and the Netherlands*. *Europ. J. Agronomy* 7, pp. 271-283, 1997, Sachverständigen für Umweltfragen.
- Römer, A.; Abel, H. J.; Moerschner, J. und H. Döhler (1999): Stoffbilanz und Fossilenergieaufwand in unterschiedlichen intensiven Systemen der Milchproduktion. VDLUFA-Kongress, Halle, 15.09.1999.
- Sands, G. R. und T. H. Podmore (2000): A generalized environmental sustainability index for agricultural systems. *Agriculture, Ecosystem and Environment* (79), pp. 29-41.
- Schmidt, S. (2001): Energiemanagement in der Nutztierhaltung: Analyse der Energiewirtschaft großer Milchviehanlagen und der Eigenversorgung mit Energie aus Biogas. Brandenburgische Technische Universität Cottbus.
- Schneider, F. (1996): Analyse des Réemplois, Résyclages, Valorisations de Déchets par l'Etude de Systèmes Cascade. Thèse 96ISAL0132, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Scholz, V.; Berg, W. und P. Kaulfuß (1998): Energy Balance of Solid Biofuels. *J. agric. Engng Res.* 71, pp. 263-272.
- Scholz, V. und P. Kaulfuß (1995): Energiebilanz für Festbrennstoffe. Forschungsbericht 1995/3, Institut für Agrartechnik Potsdam (ATB).
- Schwarz, S. (2001): Sensitivitätsanalyse und Optimierung bei nichtlinearem Strukturverhalten. Institut für Baustatik, Universität Stuttgart, Dissertation, Bericht-Nr. 34.
- Siebers, L. (1997): Ökobilanzen - von der Erzeugung bis zum Produkt. Vorträge der DLG-Umweltgespräche am 18. Juni 1997 in Bonn, S. 3-5.

- Smil, V. (1985): Carbon - Nitrogen - Sulfur - Human Interferences in Grand Biospheric Cycles. Plenum Press, New York and London.
- Spiekers, H. und V. Potthast (2004): Erfolgreiche Milchviehfütterung. 4. völlig neu überarbeitete Auflage, Frankfurt am Main, DLG-Verlags-GmbH, ISBN 3-7690-0573.
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (1998): Umweltgutachten 1998 - Umweltschutz - Erreichtes sichern - Neue Wege gehen. 13/10195, Deutscher Bundestag.
- Statistisches Bundesamt (2004): Statistisches Jahrbuch 2004 für die Bundesrepublik Deutschland. Wiesbaden, Fachserie 3, Reihe 4, S. 775, ISBN 3-8246-0711-5.
- Statistisches Jahrbuch (2005): Land Brandenburg/Hrsg. Landesvertrieb für Datenverarbeitung und Statistik, Dezernat für Informationsmanagement. Potsdam, S. 234.
- Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1997): Hrsg.: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Münster-Hiltrup, Landwirtschaftsverlag, S. 129.
- Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1999): Hrsg.: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Münster-Hiltrup, Landwirtschaftsverlag, S. 128.
- Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2005): Hrsg.: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Münster-Hiltrup, Landwirtschaftsverlag, S. 130 und 144.
- Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2008): Hrsg.: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Münster-Hiltrup, Landwirtschaftsverlag, S. 131.
- Taube, F.; Loger, R. und M. Wachendorf (2003): Umwelt- und ressourcenrelevante Auswirkungen pflanzenbaulicher Produktionssysteme. In: Perspektiven in der Tierproduktion. Ernst Jürgen Lode und Franz Ellendorf (Hrsg.): Landbauforschung Völkenrode, FAL, Sonderheft 263, Braunschweig, Deutschland, S. 39-51.
- Tröger, F. (2003): Abschaltautomatik hat ihre Tücken. DLZ, Jg. 54, H. 12, S. 68-71.
- UBA (Umweltbundesamt) (1997): Nachhaltiges Deutschland - Wege zu einer dauerhaft-umweltgerechten Entwicklung -. Umweltbundesamt Berlin, Berlin.
- UBA (Umweltbundesamt) (2001): Daten zur Umwelt - Der Zustand der Umwelt in Deutschland 2000. Erich-Schmidt-Verlag, Berlin.
- UBA (Umweltbundesamt) (2002): Beste verfügbare Technik in der Intensivtierhaltung. UBA-Texte 75/02.

- Uhlin, H.-E. (1999): Energy productivity of technological agriculture - lessons from the transition of Swedish agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **73**, pp. 63-81.
- van Dasselaar, A. und R. Pothoven (1994): Energieverbrauch in der Nederlandse landbouw. Vergelijking van verschillende bemestingsstrategieën. 6708 PW Wageningen.
- van Keulen, H. (1995): Sustainability and long-term dynamics of soil organic matter and nutrients under alternative management strategies. In: J. Burma, editor. *Eco-regional approaches for sustainable land use and food production*. pp. 353-375.
- Verein Deutscher Ingenieure (1997): VDI-Richtlinien: VDI 4600 Kumulierter Energieaufwand. VDI-Gesellschaft Energietechnik, Beuth-Verlag GmbH, Berlin.
- Vine, A. und D. Bateman (1981): The Competitive position of Organic farming. Organic farming-Systems in England and Wales: Practise, Performance and Implications, Vine, A.; Bateman, D., Aberystwyth, pp. 100-126.
- Walz, R. (1997): Grundlagen für ein nationales Umweltindikatorensystem - Weiterentwicklung von Indikatorensystemen für die Umweltberichterstattung -. Umweltbundesamt.
- Walz, R. (1998): Grundlagen für ein nationales Umweltindikatorensystem: Erfahrungen mit der Weiterentwicklung des OECD-Ansatzes. *Zeitschrift für angewandte Umweltforschung* **11**, S. 252-265.
- Wangler, A. (2006): Untersuchungen zur Lebensleistung und Nutzungsdauer von Milchkühen. *Rinderpraxis, Nutztierpraxis aktuell*, S. 22-24.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung globale Umweltveränderung) (2000): *Welt im Wandel: Erhaltung und nachhaltige Nutzung der Biosphäre*. Jahresgutachten 1999, Berlin/Heidelberg, Springer Verlag.
- WCED (World Commission of Environment and Development) (1987): *Our common future (Brundtland-Report)*.
- Wechselberger, P. (2000): Ökonomische und ökologische Beurteilung unterschiedlicher landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen und -systeme anhand ausgewählter Kriterien. 502. FAM-Bericht 43, Forschungsverband Agrarökosysteme München; TU München; GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit.
- Weidema, B. (2001): Avoiding Co-Product Allocation in Life-Cycle Assessment. *J. of Industrial Ecology* **4** (3), pp. 11-33.
- Weiher, O. (2004): Reproduktionsraten im Auge behalten. *Nutztierpraxis aktuell*, Ausgabe **8**, März 2004.
- Wetterich, F. (2004): Umweltindikatorensysteme: Entwicklung und Anwendung am Beispiel der Landwirtschaft. **92**, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität; Institut für organischen Landbau; Bonn.

Yli-Viikari, A. (1999): Indicators for Sustainable agriculture - a theoretical framework for classifying and assessing indicators. *Agricultural and food science* (in Finland) 8, pp. 265-283.

Zhu, J. (2005): Energy Demand of Imported Soybean as Animal Feed. Bachelor Thesis, BTU Cottbus.

#### Internetquellen

- [1] [www.rp-kassel.de/static/themen/naturschutz/1rp2000/hilfen/glossar/b\\_gloss.htm](http://www.rp-kassel.de/static/themen/naturschutz/1rp2000/hilfen/glossar/b_gloss.htm) (Juli 2007)
- [2] [www.umweltbildung.at/nachhaltigkeit](http://www.umweltbildung.at/nachhaltigkeit) (Juni 2007)
- [3] [www.scienceinthebox.com/de\\_DE/sustainability/lifecycleassessment\\_de.html](http://www.scienceinthebox.com/de_DE/sustainability/lifecycleassessment_de.html) (Januar 2008)
- [4] [www.uni-kassel.de](http://www.uni-kassel.de) (Mai 2008)
- [5] [http://kali-gmbh.com/duengemittel/fachinfo/beratung/kultur\\_gruenland.cfm](http://kali-gmbh.com/duengemittel/fachinfo/beratung/kultur_gruenland.cfm) (Juni 2007)
- [6] [www.portal-rind.de/besam\\_fru.htm](http://www.portal-rind.de/besam_fru.htm) (April 2008)
- [7] [www.weltderphysik.de](http://www.weltderphysik.de) (Januar 2008) (Wagner, H.-F., 2008)
- [8] [www.naehrwerttabelle.de/lebensmittel/getreide/getreide.htm](http://www.naehrwerttabelle.de/lebensmittel/getreide/getreide.htm) (September 2008)
- [9] [www.ktbl.de/index.php?id=355](http://www.ktbl.de/index.php?id=355) (Januar 2008)

## **10     Anhang**

### **10.1    Anhang A - Begriffserklärungen**

#### Allokation:

Zuordnung der Input- und Outputflüsse eines Moduls auf das untersuchte Produktsystem (ISO 14040, 1997).

#### Auswertung:

Bestandteil der Ökobilanz, bei dem die Ergebnisse der Sachbilanz oder der Wirkungsabschätzung oder beide mit dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen zusammengeführt werden, um Schlussfolgerungen und Empfehlungen zu geben (ISO 14040, 1997).

#### Driving-Force-Indicator (indirekter Indikator):

Sie erfassen umweltrelevante Aktivitäten, die potenziell Druck auf die Umwelt ausüben können (MÜNCHHAUSEN & NIEBERG, 1997). Indem sie die Intensität des menschlichen Einflusses auf ein Schutzgut verdeutlichen, setzen sie nur indirekt an den Umweltzustand an. Da sie einer tatsächlich feststellbaren Umweltveränderung zeitlich-kausal vorausgehen, kommt ihnen eine wichtige Funktion als Frühwarnsystem zu.

#### Elementarfluss:

- Stoff oder Energie, der bzw. die dem untersuchten System zugeführt wird und der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen wurde.
- Stoff oder Energie, der bzw. die das untersuchte System verlässt und ohne abschließende Behandlung durch den Menschen an die Umwelt abgegeben wird (ISO 14040, 1997).

#### Energiebilanz:

Im Bereich der Physik ist Energie einer der zentralsten Begriffe. Jedes physikalische System hat zu jedem Zeitpunkt einen ganz bestimmten Energieinhalt. Wenn ein System aber einen Prozess durchläuft und dabei Energie mit einem anderen System austauscht, kann für die ausgetauschte Energie eine Energiebilanz aufgestellt werden. In einem thermisch abgeschlossenen System kann Energie weder erzeugt noch vernichtet werden,

sie wird immer zwischen Systemen in bestimmten Energieformen getauscht, die den ablaufenden Prozess charakterisieren (QUELLE 7).

Die physikalische Einheit der Energie allgemein wird von dem Spezialfall

Arbeit = Kraft · Weg abgeleitet:

$$\text{Energie} = \text{Kraft} \cdot \text{Weg} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{Nm} = \text{J}$$

Die international festgelegte Einheit der Energie heißt Joule (J).

#### Energieeffizienz:

Unterschiedliche Formen von Energie können ineinander umgewandelt und auf verschiedene Systeme übertragen werden. Bei der Umwandlung von einer Energieform in eine andere wird stets ein Teil der zugeführten Energie an die Umwelt abgegeben. Diese abgeführte Energie ist nicht für den eigentlichen Prozess nutzbar. Die Energieeffizienz beschreibt das Verhältnis der im System entstehenden nutzbaren Energie zu der zugeführten Energie.

#### Energiefluss:

In Energieeinheiten quantifizierter Input oder Output aus einem Modul oder Produktsystem.

ANMERKUNG: Ein Energiefluss, der ein Input ist, kann mit Energieinput bezeichnet werden; ein Energiefluss, der ein Output ist, kann mit Energieoutput bezeichnet werden (ISO 14041, 1998).

#### Energieintensität:

Sie entspricht dem Energieeinsatz je Produkteinheit. Als Bezugsgröße werden  $\text{MJ kg}^{-1}$  Milch,  $\text{MJ kg}^{-1}$  Fleisch,  $\text{MJ kg}^{-1}$  Nährstoff genutzt.

#### Fortwärme:

Enthält alle an die Umgebung freigesetzten fühlbaren und latenten Wärmemengen aus antropogenen Prozessen, die mit Energieumsatz verbunden sind. Die Fortwärme wird an die Umwelt abgegeben. Sie wird damit Bestandteil der Umweltenergie und kann dann als Fortwärme nicht mehr identifiziert werden (VDI 4600, 1997).

### Indikatoren:

Als Indikatoren werden Parameter (Messgrößen) oder von Parametern abgeleitete Werte verstanden, die Informationen über einen bestimmten Sachverhalt liefern. Die Bedeutung eines Indikators geht in der Regel über den unmittelbar mit dem Parameter verbundenen Sachverhalt hinaus (OECD, 1997). Systematisierungen und Zusammenstellungen von Indikatoren nach einem bestimmten konzeptionellen Ansatz werden allgemein als Indikatorensysteme bezeichnet. Ist kein System im Sinne des konzeptionellen Ansatzes erkennbar, sollte besser von Indikatorensatz, -katalog oder -liste gesprochen werden. CHRISTEN ET AL. (2002) geben als Kriterium für eine Einstufung als Indikatorensystem die hinreichende Berücksichtigung von Wechselwirkungen an (WETTERICH, 2004).

Neben allgemeinen Nachhaltigkeitsindikatoren (BMU, 2000) werden in der Administration (Politik und Verwaltung) differenzierte, problem- und sektorspezifische Indikatoren(-systeme) benötigt. Um möglichst aussagefähige und belastbare Umweltinformationen zu erhalten, sollten die Indikatoren folgenden Anforderungen genügen (OECD, 1997): Die Indikatoren sollten auf hochwertigen statistischen Daten beruhen. Die Indikatoren sollten methodisch abgesichert sein, das bedeutet, dem aktuellen Forschungsstand entsprechen und international akzeptiert sein. Sie sollten außerdem ein hohes Maß an Politikrelevanz und Benutzerfreundlichkeit aufweisen.

### Input:

Stoff oder Energie, der bzw. die einem Prozess zugeführt wird.

ANMERKUNG: Stoffe können Ausgangsmaterialien und Produkte einbeziehen (ISO 14040, 1997).

### Kompaktstall:

Als Kompaktstall wird ein Laufstall bezeichnet, der in der Regel für bis zu 200 Tiere alle Funktionsbereiche in sich beherbergt. Die Funktionsbereiche sind Liegen, Laufen, Fressen und Melken (FAHR & Lengerken, 2003).

### Kumulierter Energieaufwand:

"Der *Kumulierte Energieaufwand* (KEA) gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann" (VDI-RICHTLINIE 4600, 1997).



Kuppelprodukte:

Kuppelprodukte sind die in einem Produktionsgang zwangsläufig und gleichzeitig anfallenden zwei oder mehreren Produkte (VDI 4600, 1997).

Kuppelproduktion:

Kuppelproduktion ist die Herstellung zumindest zweier Produkte, wobei die Produktion des einen zwangsläufig den Anfall des anderen verursacht (VDI 4600, 1997).

Modul:

Kleinsten Anteil eines Produktsystems, für den zur Erstellung einer Ökobilanz Daten gesammelt werden (ISO 14040, 1997).

Nachhaltigkeit:

In der vorliegenden Arbeit wird folgende Definition des Begriffes der landwirtschaftlichen Nachhaltigkeit zugrunde gelegt: "Die Fähigkeit eines lebenden Systems, bei Nutzung und Ausgleich der Verluste dauerhaft gleiche Leistungen zu erbringen, ohne sich zu erschöpfen." (QUELLE 1)

Die verwendete Definition des nachhaltigen Wirtschaftens lautet wie folgt: "Ökologie, Ökonomie in Einklang bringen, dass die Bedürfnisse heute lebender Menschen befriedigt werden, ohne die Bedürfnisbefriedigung künftiger Generationen zu gefährden." (QUELLE 2)

Netto-Energie-Laktation (NEL):

Das System Netto-Energie-Laktation ist ein Bewertungssystem für die Milchviehfütterung. Es ist ein Maßstab für den Energiebedarf der Tiere und für den Energiegehalt von Futtermitteln. Die Zusammenstellung einer Futterration erfolgt im NEL-System einfach durch Addition der Nettoenergiegehalte der einzelnen Rationskomponenten (KIRCHGESSNER, 1997). Die Nettoenergie wird in Megajoule [MJ] angegeben (SPIEKERS & POTTHAST, 2004).

Nutzbare Rohprotein am Darm (nXP):

Das nutzbare Rohprotein ist das am Dünndarm verfügbare Protein. Das nutzbare Rohprotein am Dünndarm setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, dem unabgebauten

Futterprotein und dem Mikrobenprotein. Die Menge des unabgebauten Proteins hängt hauptsächlich von der Art des Futterproteins ab, während die Menge von Mikrobenprotein eng mit der Energiezufuhr korreliert (KIRCHGESSNER, 1997). Futterbewertung und Eiweißbedarf werden bei der Milchkuh in nXP ausgedrückt (SPIEKERS & POTTHAST, 2004).

#### Nutzenergie:

Energie, welche beim Verbraucher nach der letzten Umwandlung für den jeweiligen Zweck zur Verfügung steht. Technische Form der Energie, welche der Verbraucher für den jeweiligen Zweck letztlich benötigt, also z. B. Wärme, mechanische Energie, Licht, Nutzelektrizität (z. B. für Galvanik und Elektrolyse) und elektromagnetische Strahlung (VDI 4600, 1997).

#### Ökobilanz (LCA):

Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebenswegs (ISO 14040, 1997).

#### Output:

Stoff oder Energie, der bzw. die von einem Modul abgegeben wird.

ANMERKUNG: Stoffe können Ausgangsmaterialien, Zwischenprodukte, Produkte, Emissionen und Abfall einschließen (ISO 14040, 1997).

#### Produktsystem:

Zusammenfassung der durch Material- und Energieflüsse verbundenen Module, die eine oder mehrere festgelegte Funktionen erfüllen.

ANMERKUNG: In dieser internationalen Norm wird der Begriff "Produkt" nicht nur auf Produktsysteme angewendet, sondern kann auch für Dienstleistungen gelten (ISO 14040, 1997).

#### Prozessenergie:

Für ein Modul benötigter Energieinput zum Betreiben des Prozesses oder der Einrichtungen innerhalb des Prozesses, mit Ausnahme des Energieinputs für die Bereitstellung dieser Energie (ISO 14041, 1998).

Reproduktionsrate (RR):

Die Reproduktionsrate (RR) gibt den Anteil der Kühe und Färsen am Durchschnittskuhbestand an, der für die Remontierung der Herde eingesetzt wird.

Die RR berücksichtigt zusätzlich die Bestandsveränderungen. Damit wird eine direkte Vergleichbarkeit über Jahre und Betriebe ermöglicht.

$$RR = \frac{(\text{Färsenkalbungen} + \text{Kuhzukäufe} - \text{Zuchtkuhverkäufe} - \text{Bestandsveränderungen})}{\text{Durchschnittskuhbestand}} \cdot 100$$

Teilweise wird die RR auch ohne Beachtung der Bestandsveränderungen ausgewiesen:

$$RR^* = \frac{(\text{Färsenkalbungen} + \text{Kuhzukäufe} - \text{Zuchtkuhverkäufe})}{\text{Durchschnittskuhbestand}} \cdot 100$$

Bestandsveränderungen = Jahresendbestand - Jahresanfangsbestand (QUELLE 6)

Rohstoff:

Primäres oder sekundäres Material, das zur Herstellung eines Produktes verwendet wird (ISO 14040, 1997).

Ruminale N-Bilanz (RNB):

In den Vormägen wird Stickstoff [N] aus dem Futterprotein freigesetzt und von den Mikroben zur Bildung von Mikrobenprotein genutzt. Die ruminale N-Bilanz gibt an, ob im Pansen bei der Umsetzung der einzelnen Futtermittel N im Mangel oder Überschuss ist. Maßgebend ist die RNB in der gesamten Ration (SPIEKERS & POTTHAST, 2004)

Sachbilanz:

Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktsystems im Verlauf seines Lebenswegs umfasst (ISO 14040, 1997).

Sensitivitätsanalyse:

"Systematisches Verfahren zur Einschätzung der Wirkungen der ausgewählten Methoden und Daten auf die Ergebnisse einer Studie" (ISO 14041, 1998).

Der Einfluss einzelner Parameter auf das Ergebnis des Standardverfahrens wird untersucht. Dabei werden einzelne Parameter um definierte Werte variiert und diese Ergebnisse werden mit dem Ergebnis des Standardverfahrens verglichen.

Systemgrenze:

Schnittstelle zwischen einem Produktsystem und seiner Umwelt oder anderen Produktsystemen (ISO 14040, 1997).

Total-Misch-Ration (TMR):

Die Total-Misch-Ration besteht aus allen Grundfuttermitteln sowie Ausgleichs- und Kraftfuttermitteln. Eine zusätzliche individuelle Futterzuteilung an die einzelnen Tiere entfällt. Die TMR wird gemischt und den Tieren in einem Arbeitsgang vorgelegt. Die Fütterung unter Anwendung der TMR erfolgt in Leistungsgruppen.

Unsicherheitsanalyse:

Die Unsicherheitsanalyse ist ein systematisches Verfahren zur Ermittlung und Quantifizierung der Unsicherheiten bzw. Fehler in den Ergebnissen der Sachbilanz aufgrund der Fortpflanzung von Inputfehlern und der Variabilität der Daten. Die Berechnungen werden gemäß des Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes durchgeführt.

Zwischenprodukt:

Input oder Output aus einem Modul, der eine weitere Bearbeitung benötigt (ISO 14041, 1998).

## 10.2 Anhang B - Abbildungen und Tabellen



a Kaltstall



b Außenklimastall



c Warmstall



d Leichtbaustall

Abbildung A1: Gebäudetypen der Milchviehhaltung

Tabelle A1: Energieaufwand für die Herstellung von Futtermitteln (kalkuliert mit REPRO) [GJ ha<sup>-1</sup>]

	Mineral- dünger	Saatgut	Pflanzen- schutzmittel	Diesel- kraftstoff	Maschinen	GJ/ha
<b>Mais</b>						
Ertragsklasse 1	12,17	0,63	0,23	2,84	1,57	17,44
Ertragsklasse 2	10,59	0,63	0,23	2,84	1,57	15,86
Ertragsklasse 3	8,73	0,63	0,23	2,84	1,57	14
Ertragsklasse 4	6,79	0,63	0,23	2,84	1,54	12,03
<b>Triticale</b>						
Ertragsklasse 1	8,18	3,4	0,44	2,99	1,65	16,66
Ertragsklasse 2	7,3	3,4	0,44	2,96	1,61	15,71
Ertragsklasse 3	5,65	3,4	0,44	2,86	1,53	13,88
Ertragsklasse 4	4,26	3,4	0,44	2,78	1,47	12,35
<b>Grassilage</b>						
Ertragsklasse 1	8,52	0	0	3,63	4,91	17,06
Ertragsklasse 2	4,64	0	0	2,8	3,69	11,13
Ertragsklasse 3	2,76	0	0	2,12	2,47	7,35
Ertragsklasse 4	1,4	0	0	2,24	2,51	6,15
<b>Weide</b>						
Ertragsklasse 1	6,32	0	0	0,75	0,49	7,56
Ertragsklasse 2	3,82	0	0	0,75	0,47	5,04
Ertragsklasse 3	1,42	0	0	0,74	0,46	2,62
Ertragsklasse 4	0,62	0	0	1,4	0,46	2,48
<b>Heu</b>						
Ertragsklasse 1	8,28	0	0	3,27	1,94	13,49
Ertragsklasse 2	5,14	0	0	2,25	1,32	8,71
Ertragsklasse 3	3,5	0	0	2,25	1,32	7,07
Ertragsklasse 4	1,46	0	0	2,34	1,28	5,08

Tabelle A2: Energieaufwand für Ackergrasanbau (kalkuliert mit REPRO) [GJ ha<sup>-1</sup>]

<b>Bilanz</b>	
Anzeigeebene	Schläge
Gruppe	LBG 2 Anwelksilage (3 Schnitte)
Ackerzahl	40
Hauptfrucht	Ackergras
Energiebindung HP + NP (GJ/ha)	126,04
- Energiebindung Hauptprodukt (GJ/ha)	126,04
- Energiebindung Nebenprodukt (GJ/ha)	0
Ertrag HP + NP (GE/ha)	42,79
- Getreideeinheit HP (GE/ha)	42,79
- Getreideeinheit NP (GE/ha)	0
Mineraldünger ges. (GJ/ha)	4,64
- Mineraldünger-N (GJ/ha)	2,26
- Mineraldünger-P (GJ/ha)	0,81
- Mineraldünger-K (GJ/ha)	1,57
Dieseldraftstoff ges. (GJ/ha)	4,24
- Anbau (GJ/ha)	1,44
- Ernte HP (GJ/ha)	2,81
- Ernte NP (GJ/ha)	0
Maschinen und Geräte ges. (GJ/ha)	4,01
- Anbau (GJ/ha)	0,46
- Ernte HP (GJ/ha)	3,56
- Ernte NP (GJ/ha)	0
Einsatz fossiler Energie (GJ/ha)	12,9
Energieoutput (GJ/ha)	126,04
Energiegewinn (GJ/ha)	113,14
Energieintensität (MJ/GE)	301,41
Output/Input-Verhältnis	9,77





## 1. Fortsetzung Tabelle A3

Futtermittel	Sommerleistungsgruppe 1 (51 Tage)						Sommerleistungsgruppe 2 (101 Tage)					
	TM [kg]	[MJ NEL]	xNP [g]	RNB [g]	XF [g]	EA [MJ/Kuh und Tag]	TM [kg]	[MJ NEL]	xNP [g]	RNB [g]	XF [g]	EA [MJ/Kuh und Tag]
<b>A. Grobfuttermittel</b>												
Pressschnitzel		0	0	0	0	0,0		0	0	0	0	0,0
Grassilage	3	18,30	411	14	780	6,0	3,5	21,35	480	16	910	7,0
Maissilage	5	32,00	650	-36	1.050	8,3	3,5	22,40	455	-25	735	5,8
Weide	6	38,40	858	35	1.440	5,0	6	38,40	858	35	1.440	5,0
Heu		0,00	0	0	0	0		0,00	0	0	0	0,0
Stroh		0,00	0	0	0	0		0,00	0	0	0	0,0
Summe	14	88,70	1.919	13	3.270	19,3	13	82,15	1.793	26	3.085	17,8
abzgl. Erhaltungsbedarf		37,70	450					37,70	450			
Summe	14	51,00	1.469				13	44,45	1.343			
reicht für ... kg Milch		15,43	17,28					13,45	15,79			
<b>B. Einsatz für Ausgleichsfutter</b>												
Erbsen		0,00	0,00	0,00	0,00	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0
Rapextraktionsschrot 00	1,2	8,64	278,40	30,84	171,60	6	0,85	6,12	197,20	21,85	121,55	4
Sojaextraktionsschrot	1	8,60	288,00	35,60	67,00	4		0,00	0,00	0,00	0,00	0
Winterweizen		0,00	0,00	0,00	0,00	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0
Triticale	1,6	13,28	272,00	-6,40	44,80	4	1,3	10,79	221,00	-5,20	36,40	3
Mineralfutter	0,1						0,1					
Summe	3,9	30,52	838,40	60,04	283,40	14,78	2,15	16,91	418,20	16,65	157,95	7,90
Summe A + B	17,9	81,52	2.307,40	72,94		34,08	15,15	61,36	1.760,70	42,60		25,70
Milch aus Grundration [kg]		24,67	27,15					18,57	20,71			
<b>C. Kraftfütterung</b>												
MLF	3,5	23,45	560	10,5	350	13	2,5	16,75	400	7,5	250	9
Milch aus Kraftfutter [kg]		7,10	6,59					5,07	4,71			
Summe A + B + C	21,4	142,67	2.867,40	83,44	3.903,40	46,61	17,65	115,81	2.160,70	50,10	3.492,95	34,65
Milch [kg/Kuh u. Tag]		31,76	33,73					23,63	25,42			
Milchleistung [kg/Kuh u. Tag]		31,76						23,63				
		3.329						4.806				
% in Futtermittel												
Milchleistung [kg/Kuh u. Jahr]					18,24						19,79	

## 2. Fortsetzung Tabelle A3

Futtermittel	Winter trocken 1 (23 Tage)						Winter trocken 2 (7 Tage)					
	TM [kg]	[MJ NEL]	xNP [g]	RNB [g]	XF [g]	EA [MJ/Kuh und Tag]	TM [kg]	[MJ NEL]	xNP [g]	RNB [g]	XF [g]	EA [MJ/Kuh und Tag]
<b>A. Grobfuttermittel</b>												
Pressschnitzel		0	0	0	0	0,0		0	0	0	0	0,0
Grassilage	8,5	51,85	1.165	38	2.210	16,9	6	36,60	822	27	1.560	11,9
Maissilage		0,00	0	0	0	0,0	4	25,60	520	-29	840	6,6
Weide		0,00	0	0	0	0,0		0,00	0		0	0,0
Heu	2	10,60	242	0	600	2,9		0,00	0	0	0	0,0
Stroh		0,00	0	0	0	0,0		0,00	0	0	0	0,0
Summe	10,5	51,85	1.407	38	2.810	19,8	10	62,20	1.342	-2	2.400	18,6
abzgl. Erhaltungsbedarf		37,70	450					37,70	450			
Summe	10,5	14,15	957				10	24,50	892			
reicht für ... kg Milch		4,28	11,25					7,41	10,49			
<b>B. Einsatz für Ausgleichsfutter</b>												
Erbsen		0,00	0,00	0,00	0,00	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0
Rapsextraktionsschrot 00		0,00	0,00	0,00	0,00	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0
Sojaextraktionsschrot		0,00	0,00	0,00	0,00	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0
Winterweizen		0,00	0,00	0,00	0,00	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0
Triticale		0,00	0,00	0,00	0,00	0		0,00	0,00	0,00	0,00	0
Mineralfutter	0,05						0,05					
Summe	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
Summe A + B	10,5	14,15	956,50	37,85		19,79	10	24,50	892,00	-1,80		18,56
Milch aus Grundration [kg]		4,28	11,25					7,41	10,49			
<b>C. Kraftfutterzuteilung</b>												
MLF		0	0	0	0	0	1,5	10,05	240	4,5	150	5
Milch aus Kraftfutter [kg]		0,00	0,00					3,04	2,82			
Summe A + B + C	10,5	51,85	956,50	37,85	2.810,00	19,79	11,5	72,25	1.132,00	2,70	2.550,00	23,93
Milch [kg/Kuh u. Tag]		4,28	11,25					10,45	13,32			
Milchleistung [kg/Kuh u. Tag]		4,28						10,45				
% in Futterration												
Milchleistung [kg/Kuh u. Jahr]					26,76						22,17	

### 3. Fortsetzung Tabelle A3

[illegible]

Tabelle A4: Trockenmasse, Energie- und Nährstoffgehalte sowie kumulierter Energieaufwand der Futtermittel für die Standardration

<b>Futtermittel</b>	<b>TM [g/kg]</b>	<b>NEL [MJ/kg TM]</b>	<b>xNP [g/kg TM]</b>	<b>RNB [g]</b>	<b>XF [g/kg TM]</b>	<b>EA [MJ/dt TM]</b>
Grassilage	350	6,1	137	4,5	260	198,8
Weide	180	6,4	143	5,9	240	84,0
Maissilage	310	6,4	130	-7,2	210	166,0
Heu	860	5,3	121	-0,2	300	144,7
Pressschnitzelsilage	220	7,4	157	-7,4	208	389
Sojaextraktionsschrot	880	8,6	288	35,6	67	425
Rapsextraktionsschrot	890	7,2	232	25,7	143	526
Triticale	880	8,3	170	-4	28	263,6
Weizen	880	8,5	172	-5,4	29	230,0
Gerste	880	8,1	164	-6,4	57	230,2
Erbsen	880	8,5	187	10,2	67	335,7
Stroh	860	3,5	76	-6,2	429	200
Milchleistungsfutter		6,7	160	3	100	358

Tabelle A5: Flächenbedarf für die Futterbereitstellung des Standardverfahrens der Milchviehhaltung

Futtermittel Milchvieh	Maßeinheit	Grassilage	Maissilage	Weide	Heu	Triticale	Kraftfutter	ha
Anteile an Standardration	%	27	22	19	1	7	31 %	
Futtereinsatz Standardration	kg TM Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	2.200 <sup>a</sup>	1.680 <sup>b</sup>	1.212	130 <sup>c</sup>	427	1.517	
Ertragsklasse 1 Fläche	kg TM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ha Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	9.000 0,244	12.300 0,137	8.250 0,147	9.000 0,014	6.600 0,065	0,23	0,84
Ertragsklasse 2 Fläche	kg TM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ha Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	7.000 0,314	11.000 0,153	7.000 0,173	7.000 0,019	5.700 0,075	0,27	1,00
Ertragsklasse 3 Fläche	kg TM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ha Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	5.000 0,440	9.800 0,171	4.250 0,285	5.000 0,026	4.000 0,033	0,38	1,41
Ertragsklasse 4 Fläche	kg TM ha <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ha Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup>	4.000 0,550	7.600 0,221	3.260 0,372	4.000 0,033	3.100 0,138	0,49	1,80
<sup>a</sup> 20 % Verluste (REPRO)	<sup>b</sup> 15 % Verluste (REPRO)	<sup>c</sup> 30 % Verluste (REPRO)						



## 1. Fortsetzung Tabelle A6

Techn. Ausstattung	Material	Erläuterung	Typ/ Dichte	Plätze pro Stück	Masse pro Stück	Anzahl pro Tierplatz	Masse pro Tierplatz	Länge im Stall	Breite im Stall	Höhe im Stall	Größe im Stall	Anzahl im Stall	Masse im Stall	KEA* [MJ/kg]	KEA* pro Tierplatz [MJ]	KEA* im Stall [MJ]
Trenngitter	Metall	3-lagige Abtrennungen aus 2" - 1 1/2"	2,50 3,00 6,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	44,00 49,00 105,00 54,13	0,04 0,03 0,01 0,08	1,71 1,63 1,17 1,61	17,50 18,00 12,00 43,04	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	7,00 6,00 2,00 15,00	308 294 210 812			
Zubehör	Metall	Schnellverschluss Rohrpfosten Schwerlastanker für Pfosten und Bodenplatte Drehlager	0,00 D 102 mm 0,00 für D 102, 2fach 180°	1,00 1,00 1,00 1,00	2,00 20,00 0,00 2,00	0,08 0,08 0,08 0,17	0,17 0,00 0,00 0,33	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	15,00 15,00 15,00 30,00	30 300 0 60			
Selbstfängfressgitter	Metall	Steckrösen Selbstfängfressgitter Rohrpfosten Kreuz-Rundschelle	für D 102, 2fach 180° 6 m lang 1,5 m lang, gerade 2" x 1 1/2"	1,00 8,0 8,00 8,00	2,00 186,00 12,00 1,00	0,08 0,01 0,13 0,13	0,17 1,03 1,50 0,13	0,00 6,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	1,00 1,00 1,00 1,00	186 12 1 2			
Zubehör	Metall	Gitterbefestigungen an Barenmauer Gitterbestigungen an Holzsäulen Rohrendenstopfen Winkelpfosten	Hutschelle 2" Stopfen 2" 1,5 m lang, durchgehende Lochung 0,00	8,00 8,00 0,00 0,00	0,50 0,00 12,00 1,50	0,13 0,13 0,02 0,02	0,06 0,00 0,27 0,03	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	0,00 0,00 0,00 0,00	1,00 1,00 4,00 4,00	1 0 48 6			
Zubehör	Metall	Aussteller für Futterüberwurfröhr Rohrpfosten D 102 mm	0,00 mit Bodenplatte zum Aufschrauben	0,00 4,00	5,00 20,00	0,00 0,01	0,00 0,22	0,00 0,00	0,00 0,00	0,00 0,00	0,00 0,00	0,00 2,00	0 40			

\* KEA = kumulierter Energieaufwand

## 2. Fortsetzung Tabelle A6

Techn. Ausstattung	Material	Erläuterung	Typ/Dichte [kg/m³]	Plätze pro Stück [-]	Masse pro Stück [kg]	Anzahl pro Tierplatz [-]	Masse pro Tierplatz [kg]	Länge im Stall [m]	Breite im Stall [m]	Höhe im Stall [m]	Größe im Stall [m²]	Anzahl im Stall [-]	Masse im Stall [kg]	KEA* [MJ/kg]	KEA* pro Tierplatz [MJ]	KEA* im Stall [MJ]
Fressgitter	Metall	Fressgitter	5 m lang	10,00	75,00	0,10	7,50	134,00	0,00	0,00	0,00	18,00	1.350			
	Metall	Rohrpfosten	1,5 m lang, gerade	10,00	12,00	0,10	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	18,00	216			
	Metall	Kreuzrundschele	2" x 1 1/2"	10,00	1,00	0,10	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	18,00	18			
	Metall	Gitterbestüngen in Barenmauer	T-Schelle 2" x 2"	10,00	2,00	0,10	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	18,00	36			
	Metall	Gitterbestüngen an Holzstulen	Hutschelle	10,00	0,50	0,10	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	18,00	9			
	Metall	Rohrendenstopfen	Stopfen 2"	10,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,00	0			
	Metall	Winkelpfosten	1,5 m lang, durchgehende Lochung	0,00	12,00	0,02	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	48			
	Metall	Wandwinkel	0,00	0,00	1,50	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	6			
	Metall	Aussteller für Futterüberwurfrohr	0,00	0,00	5,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0			
	Metall	Rohrpfosten, mit Bodenplatte		4,00	20,00	0,20	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36,00	720			
Weidenfütterraufen (rund)	Metall	Rundraufe	0,00	0,00	193,00	0,01		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
Heizleitung	Metall	Frostschutzheizung mit Thermostat	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0			
<b>Summe für Metallteile</b>																
Zubehör zum Liegeboxentrennbügel	Metall, feuerverzinkt	Schwerlastanker M12 x 116	für Liegeboxenfüße	0,50	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	360,00	0	35,37	894,68	167.742,23
Zubehör zum Liegeboxentrennbügel	Metall, feuerverzinkt	Befestigungssatz		1,00	2,00	1,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	180,00	360			
<b>Summe für verzinkte Metallteile für Typ Gäu</b>																
Zubehör zum Fressgitter	Metall, feuerverzinkt	Schwerlastanker		2,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	76,00	0	35,37	70,74	12.733,20
Weidenfütterraufen	Blechboden, feuerverzinkt	Raufe mit 14 Fressplätzen	Typ Selbstfang-Safety	0,00	615,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0			

\* KEA = kumulierter Energieaufwand



## 3. Fortsetzung Tabelle A6

Techn. Ausstattung	Material	Erläuterung	Typ/Dichte [kg/m³]	Plätze pro Stück [-]	Masse pro Stück [kg]	Anzahl pro Tierplatz [-]	Masse pro Tierplatz [kg]	Länge im Stall [m]	Breite im Stall [m]	Höhe im Stall [m]	Größe im Stall [m²]	Anzahl im Stall [-]	Masse im Stall [kg]	KEA* [MJ/kg]	KEA* pro Tierplatz [MJ]	KEA* im Stall [MJ]
<i>Summe für verzinkte Metallteile</i>																
Bodenbeläge	Estrich, Fliesen	im Melk- und Milchbereich	1.040,00	0,00	0,00	0,00	54,92	237,63	0,00	0,04	9,51	0,00	9.885	33,37	0,00	0,00
<i>Summe für Teile aus Gussasphalt</i>																
Innenwände	Kalksandstein	im Milchbereich	1.400,00	0,00	0,00	0,00	207,98	111,42	0,00	0,24	26,74	0,00	37.437	5,34	293,44	52.819,31
Außenwände	Kalksandstein	im Milchbereich	1.400,00	0,00	0,00	0,00	196,15	105,08	0,00	0,24	25,22	0,00	35.307			
<i>Summe für Kalksandsteinteile</i>																
Außenwand-bekleidung	Putz und Anstrich	von innen	1.200,00	0,00	0,00	0,00	33,16	331,62	0,00	0,02	4,97	0,00	5.696	1,19	482,79	86.902,99
Innenwand-bekleidung	Putz	im Melk- und Milchbereich	1.200,00	0,00	0,00	0,00	20,03	200,26	0,00	0,02	3,00	0,00	3.605			
<i>Summe für Teile aus Putzmörtel</i>																
Deckenkonstruktionen	Vollholzbalken	über Melk- und Milchbereich	649,35	45,90	3.005,53	0,00	49,00	192,15	0,30	0,30	13,58	2,93	8.820	0,85	45,40	8.172,61
Dachkonstruktionen	Vollholzbalken	Dachpfetten	649,35	45,90	45,90	0,00	35,70	140,00	0,30	0,30	9,90	140,00	6.426			
Deckenbeläge im Melk- und Milchbereich	Holz	Holzbohlen	600,00	0,00	0,00	0,00	25,80	221,12	0,00	0,04	7,74	0,00	4.643			
Binder	Kanthalzbinde	Tragkonstruktion	600,00	0,00	6.914,69	0,00	488,92	1.666,76	0,44	0,20	146,68	12,73	88.005			
Außentüren	Holz	0,00	600,00	0,00	0,00	0,00	59,49	74,36	0,00	0,24	17,85	0,00	10.708			
Innentüren und Fenster	Holz	0,00	600,00	0,00	0,00	0,00	8,51	10,64	0,00	0,24	2,55	0,00	1.532			
<i>Summe für Holzteile</i>																
Außenwand-bekleidung	Mauerwerk, Sichtzuschlag	von außen	1.200,00	0,00	0,00	0,00	230,76	115,38	0,00	0,30	34,61	0,00	41.537	0,17	112,53	20.254,67
<i>Summe für Teile aus Mauerwerk</i>																
Viehbürste	Kunststoff, Metall	0,00	Euro-Farm	0,00	15,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	15	2,71	625,12	112.521,45
Ersatzbürste	Kunststoff,	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2			
Klaueband	PE	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	5			
Dachfenster, Dachöffnungen	Lichtkuppelfirst	Armen's M5	1.000,00	0,00	0,00	0,00	2,50	69,28	0,00	0,01	0,45	1,00	450	110,10	275,45	49.581,41

\* KEA = kumulierter Energieaufwand

## 4. Fortsetzung Tabelle A6

Techn. Ausstattung	Material	Erläuterung	Typ/Dichte [kg/m³]	Plätze pro Stück [-]	Masse pro Stück [kg]	Anzahl pro Tierplatz [-]	Masse pro Tierplatz [kg]	Länge im Stall [m]	Breite im Stall [m]	Höhe im Stall [m]	Größe im Stall [m²]	Anzahl im Stall [-]	Masse im Stall [kg]	KEA* [MJ/kg]	KEA* pro Tierplatz [MJ]	KEA* im Stall [MJ]
Gülleleitungen	PVC-U oder PE-HD oder PVC-C, PP und ABS/ASA	Güllerohrleitung, gen NW 300	1.550,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
<b>Summe für Kunststoffteile</b>																
Betonverriegelung	Quarzsand	für Spaltenbo-den	0,00	0,00	8,00	0,00	0,26	892,03	0,00	0,00	0,00	5,95	48	110,10	13,46	2.422,26
<b>Summe für Teile aus Sand</b>																
Zubehör der Aluminium Hetzleitung	Alu-Klebeband		0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0	0,55	0,14	25,95
<b>Summe für Aluminiumteile</b>																
Liegeflächenabdeckung	Gummi	Gummimatten	KSL-Noppenmatte, mit Randverstärkung	0,44	14,00	2,29	32,03	1,83	225,00	0,03	12,35	180,00	5.765	191,37	0,00	0,00
<b>Summe für Gummitheile</b>																
Heizsystem	Edelstahl	Modell 313, Heizgerät Puls-tronic	0,00	0,00	11,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	11	94,74	3.033,94	546.109,82
Zubehör der Heizsysteme	Edelstahl	Entlüftungs-ventil	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0			
	Edelstahl	Thermometer	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0			
	Edelstahl	Durchflüss-anzeige	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1			
	Edelstahl	Kipptrog mit Wasser-rundlauf	0,00	0,00	1,50	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2			
Kippbare Edelstahltränke	Edelstahl	Wandhaltung Standfüße für Kipptrog	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	1			
	Edelstahl	Hochleistungs-ventil	zu 60 l/min	0,00	1,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1			
<b>Summe für Edelmetalle</b>																
<b>Wählbare Teile aus verschiedenen Materialien</b>																
Stütze:	3	Kantholz	600,00	0,00	73,92	0,14	29,57	322,00	9,16	8,15	8,87	25,45	5.322			
1 Stahl																
2 Stahlbeton																
3 Kantholz																
4 Rundholz																
<b>Summe für Stütze</b>																
							29,57						5.322	0,17	4,99	897,33

\* KEA = kumulierter Energieaufwand

## 5. Fortsetzung Tabelle A6

Techn. Ausstattung	Material	Erläuterung	Typ/ Dichte [kg/m³]	Plätze pro Stück [-]	Masse pro Stück [kg]	Anzahl pro Tierplatz [-]	Masse pro Tierplatz [kg]	Länge im Stall [m]	Breite im Stall [m]	Höhe im Stall [m]	Größe im Stall [m²]	Anzahl im Stall [-]	Masse im Stall [kg]	KEA* [MJ/kg]	KEA* pro Tierplatz [MJ]	KEA* im Stall [MJ]
Nichttragende Außenwände	1	Holzbohlenwand 35 mm, Spaceboard	515,00	0,00	0,00	0,00	57,34	572,56	0,00	0,04	20,04	0,00	10.320			
1 Holz																
2 Beton																
<b>Summe für Außenwände im Stallbereich</b>																
Zwischendecke für Warmstall im Stall- und Milchbereich	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	57,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,17	9,67	1.740,02
<b>Summe für Zwischenplatte in Zwischendecke</b>																
Dämmstoff für Zwischen- decke im Stall- und Milchbe- reich	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	7,61	0,00	0,00
<b>Summe für Mineralwolle in Zwischendecke</b>																
Dachbeläge:	1	Dacheindeckungen im Stall- und Milchbereich	3.745,82	4.307,69	28,00	0,00	328,35	2.427,44	0,00	0,01	15,78	2.110,82	59.103	14,80	0,00	0,00
1 Wellfaser- zementplatten																
2 Bitumenwell- platten																
3 Trapezprofil- blech																
4 Betondach- steine																
<b>Summe für Dachendeckung</b>																
Liegeboxen- trennbügel:	2	Typ Gäu		1,00	30,00	1,00	328,45	0,00	0,00	0,00	0,00	180,00	59.103	7,61	2.499,77	449.957,82
1 Freitragende Liegeboxen																
2 Pilzbügel- Liegeboxen																
3 Freitragende Liegeboxen																
Liegeboxen mit Trage- rohren																
<b>Summe für Metallteile für Typ Gäu</b>																
<b>Summe für Metallteile für Typ Gäu</b>														35,37	2.148,73	386.877,06

\* KEA = kumulierter Energieaufwand

6. Fortsetzung Tabelle A6

Techn. Ausstattung	Material	Erläuterung	Typ/ Dichte	Plätze pro Stück	Masse pro Stück	Anzahl pro Tierplatz	Masse pro Tierplatz	Länge im Stall	Breite im Stall	Höhe im Stall	Größe im Stall	Anzahl im Stall	Masse im Stall	KEA* [MJ/kg]	KEA* pro Tierplatz [MJ]	KEA* im Stall [MJ]
Tränkebecken: 1 Edelstahl 2 Guss emailiert 3 Kunststoff 4 Kunststoff mit Edel- stahlabde- ckung	1	Tränkebecken	Modell 1200, mit Messing- rohrventil	0,00	68,00	0,00	3,78	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	680			
Summe für Tränke																
Zubehör Modells 1200	des Metall	Befestigungs- bügel für Trän- ke	für Rohre 1 1/2" - 2"	0,00	0,20	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	4	103,112	0,00	0,00
Wasserleitungen	Metall				3,00		2,67	160,00				160,00	480			
Summe für Zubehör der Tränke																
Summe des KEA*																
KEA = kumulierter Energieaufwand																
														103,12	666,82	120.028,19
															22.102	3.865,078

Tabelle A7: Kumulierter Energieaufwand für Maschinen in der Tierhaltung in Abhängigkeit unterschiedlicher Haltungssysteme am Beispiel des Milchviehs

	Einheit Bedarf	Bedarf Material [Tierplatz × a]	Material ohne Entsorgung [MJ/Tierplatz × a]	Masse- verbrauch [kg/Einheit]	Entsorgung der Maschinen (0,5 MJ/kg Maschinenmasse) [MJ/Tierplatz × a]	Energie Material mit Entsorgung [MJ/Tierplatz × a]	Material mit Entsorgung [MJ/kg Milch bei 8.000 l/a]	Material ohne Entsorgung [MJ/kg Milch bei 8.000 l/a]
<b>Milchvieh auf Gülle</b>								
Silageschneidzange	m³	49,78	487,24	4,51	2,255	489,495	0,061187	0,060905
Schlepper	h	5,23	169,45	1,57	0,785	170,235	0,021279	0,021181
Futtermittelwagen	m³	49,78	839,25	7,77	3,885	843,135	0,105392	0,104906
Hofschlepper	h	3,22	59,89	0,55	0,275	60,165	0,007521	0,007486
Futterschiebeschild	h	3,22	34,78	0,32	0,16	34,94	0,004368	0,004348
Güllepumpe	h	0,13	0,03	0	0	0,03	3,75E-06	3,75E-06
Elektroenergie	kWh	50	515			515	0,064375	0,064375
Dieselskraftstoff	l	36,413	1.441,95			1.441,95	0,180244	0,180244
			<b>3.547,59</b>		<b>7,36</b>	<b>3.554,95</b>	<b>0,44</b>	<b>0,44</b>
<b>Milchvieh auf Gülle, Weide</b>								
Silageschneidzange	m³	37,51	367,1	3,4	1,7	368,8	0,0461	0,045888
Schlepper	h	3,94441	127,8	1,18	0,59	128,39	0,016049	0,015975
Futtermittelwagen	m³	37,51	632,31	5,85	2,925	635,235	0,079404	0,079039
Hofschlepper	h	2,42603	45,12	0,42	0,21	45,33	0,005666	0,00564
Futterschiebeschild	h	2,42603	26,2	0,24	0,12	26,32	0,00329	0,003275
Draht Stahl	kg	0,1	0,6625	0	0	0,6625	8,28E-05	8,28E-05
Draht Kunststoff	kg	0,06	2,226	0	0	2,226	0,000278	0,000278
Kunststofffähe	kg	0,89	9,9057	0	0	9,9057	0,001238	0,001238
Griffe Stahl	kg	0,004	0,00795	0	0	0,00795	9,94E-07	9,94E-07
Griffe Kunststoff	kg	0,01	0,019875	0	0	0,019875	2,48E-06	2,48E-06
Eckpfähle	kg	0,03	0,3339	0	0	0,3339	4,17E-05	4,17E-05
Weidezaungerät, elektrisch	kWh	0,14	-	0	0	-	-	-
Weidezaungerät, Masse	kg	0,017	0,2295	0,017	0,0085	0,238	2,98E-05	2,98E-05
Weidetränke	m³		23,19			23,19	0,002899	0,002899
Pumptankwagen	h	0,72	0,02	0,42	0,21	0,23	2,88E-05	2,88E-05
Säubern, Auslauf am Stall								
Güllepumpe	h	0,09795	0,02	0	0	0,02	2,5E-06	2,5E-06
Elektroenergie	kWh	37,8112	389,4557			389,4556986	0,048682	0,048682
Dieselskraftstoff	l	27,4557	1.087,24			1.087,24	0,135905	0,135905
			<b>2.711,841</b>		<b>5,7635</b>	<b>2.717,6</b>	<b>0,34</b>	<b>0,34</b>

## 1. Fortsetzung Tabelle A7

	Einheit Bedarf	Bedarf Material [Tierplatz × a]	Material ohne Entsorgung [MJ/Tierplatz × a]	Masse- verbrauch [kg/Einheit]	Entsorgung der Maschinen (0,5 MJ/kg Maschinenmasse) [MJ/Tierplatz × a]	Energie Material mit Entsorgung [MJ/Tierplatz × a]	Material mit Entsorgung [MJ/kg Milch bei 8.000 l/a]	Material ohne Entsorgung [MJ/kg Milch bei 8.000 l/a]
<i>Milchvieh auf Mist</i>								
Silageschneidzange	m³	49,78	487,24	4,51	2,255	489,495	0,061187	0,060905
Schlepper	h	5,23	169,45	1,57	0,785	170,235	0,021279	0,021181
Futtermittelwagen	m³	49,78	839,25	7,77	3,885	843,135	0,105392	0,104906
Hofschlepper	h	4,32	80,35	0,74	0,37	80,72	0,01009	0,010044
Futterschiebeschild	h		0	0	0	0	0	0
Schaufel mit Krokodilaufsatz	h	4,32	12,96	0,12	0,06	13,02	0,001628	0,00162
Güllepumpe	h	0,09	0,03	0	0	0,03	3,75E-06	3,75E-06
Elektroenergie	kWh	50	515			515	0,064375	0,064375
Dieselmotortreibstoff	l	39,383	1.559,57			1.559,57	0,194946	0,194946
<b>Σ kumulierter Energieaufwand</b>			<b>3.663,85</b>		<b>7,355</b>	<b>3.671,205</b>	<b>0,46</b>	<b>0,46</b>

Tabelle A8: Kumulierter Energieaufwand Nachzucht mit Ganztagsweide im Sommer

	Haltungstage	MJ Tier <sup>-1</sup> Tag <sup>-1</sup>	MJ Tier <sup>-1</sup>
<b>Fütterung</b>			
Kälber 1	7	24	168
Kälber 2	63	43	2.709
Kälber 3	42	10	420
Jungvieh	630	9,7	6.111
<b>Gebäude</b>			
Kalb	112	0,83	93
Jungvieh	630	1,22	766
<b>Technische Ausrüstung</b>			
Kalb	112	0,27	31
Jungvieh	630	0,60	380
Elektroenergie Tränkautomat pro Kalb			53
<b>Maschinen</b>			
Kalb			713
Jungvieh			1.353
<b>Summe Energieaufwand Aufzuchtfärse</b>			<b>12.797</b>

Tabelle A9: Kumulierter Energieaufwand Nachzucht ohne Weidehaltung

	Haltungstage	MJ Tier <sup>-1</sup> Tag <sup>-1</sup>	MJ Tier <sup>-1</sup>
<b>Fütterung</b>			
Kälber 1	7	24	168
Kälber 2	63	43	2.709
Kälber 3	42	10	420
Jungvieh	630	13,25	8.347
<b>Gebäude</b>			
Kalb	112	0,83	93
Jungvieh	630	1,22	766
<b>Technische Ausrüstung</b>			
Kalb	112	0,27	31
Jungvieh	630	0,60	380
Elektroenergie Tränkautomat pro Kalb			53
<b>Maschinen</b>			
Kalb			713
Jungvieh			2.543
<b>Summe Energieaufwand Aufzuchtfärse</b>			<b>16.223</b>

[illegible]



Tabelle A11: Kumulierter Energieaufwand für Maschinen in der Tierhaltung in Abhängigkeit unterschiedlicher Haltungssysteme am Beispiel des Jungviehs

	Einheit Bedarf	Bedarf Material [Tierplatz × a]	Material ohne Entsorgung [MJ/Tierplatz × a]	Masse- verbrauch [kg/Einheit]	Entsorgung der Maschinen (0,5 MJ/kg Ma- schinenmasse) [MJ/Tierplatz × a]	Energie Material mit Entsorgung [MJ/Tierplatz × a]	Material mit Entsorgung [MJ/kg Milch bei 8.000 l/a]	Material ohne Entsorgung [MJ/kg Milch bei 8.000 l/a]	Modifizierter Zeitraum (mit Entsorgung) 21 Monate [MJ]
<b>Jungtiere auf Gülle</b>									
Silageschneidzange	m³	21,29	208,39	1,93	0,965	209,355			366,37
Schlepper	h	2,98	96,55	0,89	0,445	96,995			169,74
Futtermittelwagen	m³	21,29	358,95	3,32	1,66	360,61			631,07
Hofschlepper	h	0,45	8,37	0,08	0,04	8,41			14,72
Schaufel mit Krokodilaufsatz	h	0,45	1,35	0,01	0,005	1,355			2,37
Güllepumpe	h	0,1	0,03	0	0	0,03			0,05
Elektroenergie	kWh	10	103			103			180,25
Dieselmotortank	l	17,009	673,56			673,56			1.178,73
<b>Σ kumulierter Energieaufwand</b>			<b>1.450,2</b>		<b>3,115</b>	<b>1.453,315</b>			<b>2.543,3</b>
<b>Jungtiere auf Gülle, 180 Tage</b>									
Silageschneidzange	m³	10,79	105,62	0,98	0,49	106,11			185,69
Schlepper	h	1,51441	49,07	0,45	0,225	49,295			86,27
Futtermittelwagen	m³	10,79	181,93	1,68	0,84	182,77			319,85
Hofschlepper	h	0,22808	4,24	0,04	0,02	4,26			7,46
Schaufel mit Krokodilaufsatz	h	0,22808	0,68	0,01	0,005	0,685			1,2
Krokodilgebiss			0	0	0	0			0
Draht Stahl	kg	0,08	0,53	0	0	0,53			0,93
Draht Kunststoff	kg	0,05	1,855	0	0	1,855			3,25
Kunststoffpfähle	kg	0,61	6,7893	0	0	6,7893			11,88
Griffe Stahl	kg	0,003	0,005963	0	0	0,0059625			0,01
Griffe Kunststoff	kg	0,01	0,019875	0	0	0,019875			0,03
Eckpfähle	kg	0,02	0,2226	0	0	0,2226			0,39
Weidezaungerät, elektrisch	kWh	0,46	-	0	0				
Weidezaungerät, Masse	kg	0,023	0,3105	0,023	0,0115	0,322			0,32
Weidezäune	m³		21,08			21,08			4 Tränken für 132 Tiere
Pumptankwagen	h	0,72	0,03	0,31	0,155	0,185			0
Säubern, Auslauf am Stall									
Güllepumpe	h	0,05068	0,01	0	0	0,01			0,02
Elektroenergie	kWh	5,52849	56,94348			56,94347945			99,65
Dieselmotortank	l	8,6422	342,23			342,23			598,9
<b>Σ kumulierter Energieaufwand</b>			<b>771,5667</b>		<b>1,7465</b>	<b>773,313217</b>			<b>1.353,3</b>

Tabelle A12: Kumulierter Energieaufwand Standardverfahren

<b>Energieinput</b>	<b>MJ Kuh<sup>-1</sup> Jahr<sup>-1</sup></b>	<b>MJ kg<sup>-1</sup> Milch</b>
Mineraldünger	4.323	0,54
Saatgut	333	0,04
Pflanzenschutzmittel	65	0,01
Dieselmkraftstoff	1.693	0,21
Maschinen	1.624	0,20
Zukauffuttermittel	6.064	0,76
Mineraldünger Nachzucht	1.659	0,21
Saatgut Nachzucht	50	0,01
Pflanzenschutzmittel Nachzucht	18	0,00
P-Dieselmkraftstoff Nachzucht	539	0,07
P-Maschinen Nachzucht	474	0,06
Zukauffuttermittel Nachzucht	1.399	0,17
Gebäude und bauliche Anlagen Nachzucht	378	0,05
T-Maschinen und technische Ausrüstung Nachzucht	485	0,06
T-Dieselmkraftstoff Nachzucht	629	0,08
Milchgewinnung	4.581	0,57
Gebäude und bauliche Anlagen	806	0,10
T-Maschinen und technische Ausrüstung	1.753	0,22
T-Dieselmkraftstoff	1.442	0,18
<b>Σ kumulierter Energieaufwand</b>	<b>28.315</b>	<b>3,54</b>

Tabelle A13: Überblick zur Verfahrensoptimierung des kumulierten Energieaufwands für den Verfahrensabschnitt Nachzucht in Abhängigkeit der Reproduktionsrate und des Haltungssystems

		MJ Färse <sup>-1</sup>	RR <sup>1</sup> [%]	Aufzucht- monate	Weidefütterung		Stallfütterung	
					KEA <sup>2</sup> [MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ]**	KEA <sup>2</sup> [MJ kg <sup>-1</sup> Milch]	KEA <sup>2</sup> [MJ Kuh <sup>-1</sup> Jahr <sup>-1</sup> ]**	KEA <sup>2</sup> [MJ kg <sup>-1</sup> Milch]
Futterbereit- stellung	ganzjährige Stall- fütterung	11.645	10	2,5	1.280	0,16	1.622	0,20
	Weidefütterung im Sommer (180 Tage)	9.408	15	3,75	1.919	0,24	2.433	0,30
	Stallgebäude	859	25	6,25	3.199	0,40	4.056	0,51
	technische Ausrüstung	463	30	7,5	3.839	0,48	4.867	0,61
	Maschinen		35	8,75	4.479	0,56	5.678	0,71
Jungvieh	Kalb	713	45	11,25	5.758	0,72	7.300	0,91
	Gülle ganzjährig im Stall	2.543	40	10	5.118	0,64	6.489	0,81
	Gülle Halb- jahresweide	1.353	44	11	5.630	0,70	7.138	0,89
			50	12,5	6.398	0,80	8.112	1,01
	Σ kumulierter Energieaufwand bei Variante Weidefütterung 511,84 MJ Färse <sup>-1</sup> und Aufzuchtmonat bei 25 Aufzuchtmonaten							
	Σ kumulierter Energieaufwand bei Variante Stallfütterung 648,92 MJ Färse <sup>-1</sup> und Aufzuchtmonat bei 25 Aufzuchtmonaten							

<sup>1</sup> RR = Reproduktionsrate

<sup>2</sup> KEA = kumulierter Energieaufwand

Tabelle A14: Energiebilanz Pflanzenbau - Untersuchungsbetrieb 1 -

	Einheit	2004	2005	2006	Zusammenfassung der ausgewählten Jahre
Größe	ha	125,05	125,04	125,05	125,05
Ackerzahl		31	31	31	31
<b>Energiebindung HP + NP</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>85,29</b>	<b>87,27</b>	<b>81,76</b>	<b>84,77</b>
- Energiebindung Hauptprodukt		82,29	84,42	78,91	81,87
- Energiebindung Nebenprodukt		3	2,85	2,85	2,9
<b>Ertrag HP + NP</b>	<b>GE ha<sup>-1</sup></b>	<b>37,21</b>	<b>36,28</b>	<b>33,83</b>	<b>35,78</b>
- Getreideeinheit HP		37,02	36,1	33,65	35,59
- Getreideeinheit NP		0,19	0,18	0,18	0,19
<b>Organische Dünger ges.</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>2,56</b>	<b>2,48</b>	<b>2,42</b>	<b>2,49</b>
- Stalldung		0,1	0,09	0,12	0,1
- Gülle		1,1	1,1	1,01	1,07
- Jauche		0,11	0,11	0,11	0,11
- sonstige organische Dünger		1,25	1,18	1,18	1,21
<b>Mineraldünger ges.</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>3,76</b>	<b>3,68</b>	<b>4,22</b>	<b>3,89</b>
- Mineraldünger-N		2,86	2,82	2,9	2,86
- Mineraldünger-P		0,33	0,31	0,98	0,54
- Mineraldünger-K		0,57	0,54	0,34	0,48
<b>Saatgut ges.</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>0,76</b>	<b>0,79</b>	<b>1,39</b>	<b>0,98</b>
- Brennwert		0,52	0,54	0,92	0,66
- Erzeugung		0,23	0,25	0,47	0,32
<b>Pflanzenschutzmittel ges.</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>0,21</b>	<b>0,18</b>	<b>0,16</b>	<b>0,18</b>
- Herbizide		0,13	0,12	0,1	0,12
- Fungizide		0,04	0,03	0,03	0,03
- Insektizide		0	0	0	0
- Wachstumsreg.		0,04	0,04	0,03	0,03
<b>Dieselmotorkraftstoff ges.</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>2,04</b>	<b>1,87</b>	<b>2,09</b>	<b>2</b>
- Anbau		0,74	0,68	0,77	0,73
- Ernte HP		1,26	1,16	1,31	1,24
- Ernte NP		0,04	0,02	0,01	0,03
<b>Maschinen und Geräte ges.</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>1,32</b>	<b>1,17</b>	<b>1,27</b>	<b>1,26</b>
- Anbau		0,23	0,2	0,27	0,23
- Ernte HP		1,05	0,94	0,99	0,99
- Ernte NP		0,04	0,03	0,01	0,03
Einsatz fossiler Energie	GJ ha <sup>-1</sup>	10,12	9,63	10,64	10,13
Energieoutput	GJ ha <sup>-1</sup>	84,77	86,73	80,84	84,11
Energiegewinn	GJ ha <sup>-1</sup>	74,65	77,1	70,2	73,98
Energieintensität	MJ GE <sup>-1</sup>	274,57	267,95	320,39	286,68
Output/Input-Verhältnis		8,37	9,01	7,6	8,3

Tabelle A15: Energiebilanz Grünland - Untersuchungsbetrieb 1 -

	Einheit	2004	2005	2006	Zusammenfassung der ausgewählten Jahre
Größe	ha	59,49	59,49	59,49	59,49
Ackerzahl		40	40	40	40
Energiebindung HP + NP	GJ ha <sup>-1</sup>	76,67	76,67	70,97	74,77
Ertrag HP + NP	GE ha <sup>-1</sup>	26,03	26,03	24,1	25,38
Organische Dünger ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	2,63	2,49	2,49	2,54
Mineraldünger ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	3,5	3,5	5,09	4,03
Saatgut ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	0	0	0	0
Pflanzenschutzmittel ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	0	0	0	0
Dieselmotorkraftstoff ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	1,78	1,64	1,8	1,74
Maschinen und Geräte ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	1,43	1,14	1,14	1,24
Einsatz fossiler Energie	GJ ha <sup>-1</sup>	9,35	8,77	10,52	9,55
Energieoutput	GJ ha <sup>-1</sup>	76,67	76,67	70,97	74,44
Energiegewinn	GJ ha <sup>-1</sup>	67,32	67,89	60,45	65,22
Energieintensität	MJ GE <sup>-1</sup>	359,25	337,08	436,74	376,19
Output/Input-Verhältnis		8,2	8,74	6,74	7,83

Tabelle A16: Energiebilanz Mais - Untersuchungsbetrieb 1 -

	Einheit	2004	2005	2006	Zusammenfassung der ausgewählten Jahre
Größe	ha	15,88	19,34	23,24	19,49
Ackerzahl		21	21	21	21
Energiebindung HP + NP	GJ ha <sup>-1</sup>	144,26	154,56	128,8	141,52
Ertrag HP + NP	GE ha <sup>-1</sup>	44,8	48	40	43,95
Organische Dünger ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	7,25	6,58	5,67	6,4
Mineraldünger ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	3,53	3,53	1,91	2,88
Saatgut ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	1,39	1,39	2,56	1,86
Pflanzenschutzmittel ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	0,52	0,44	0,44	0,46
Dieselmotorkraftstoff ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	3,69	3,51	3,47	3,54
Maschinen und Geräte ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	2,6	2,33	2,56	2,5
Einsatz fossiler Energie	GJ ha <sup>-1</sup>	18,25	17,04	15,26	16,66
Energieoutput	GJ ha <sup>-1</sup>	143,52	153,82	127,45	140,54
Energiegewinn	GJ ha <sup>-1</sup>	125,27	136,78	112,19	123,88
Energieintensität	MJ GE <sup>-1</sup>	411,93	358,8	390,26	384,86
Output/Input-Verhältnis		7,86	9,02	8,35	8,44

Tabelle A17: Energiebilanz Triticale - Untersuchungsbetrieb 1 -

	Einheit	2004	2005	2006	Zusammenfassung der ausgewählten Jahre
Größe	ha	8,08	6,66	4,6	6,45
Ackerzahl		30	16	21	23
Energiebindung HP + NP	GJ ha <sup>-1</sup>	141,9	156,97	156,95	150,67
Ertrag HP + NP	GE ha <sup>-1</sup>	65,4	71,06	57	65,35
Organische Dünger ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	0	0	0	0
Mineraldünger ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	5,61	5,61	6,6	5,84
Saatgut ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	3,4	3,4	4,84	3,74
Pflanzenschutzmittel ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	0,29	0,29	0,29	0,29
Dieselmotorkraftstoff ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	2,98	2,92	2,99	2,96
Maschinen und Geräte ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	1,57	1,4	1,38	1,47
Einsatz fossiler Energie	GJ ha <sup>-1</sup>	11,33	11,1	12,52	11,54
Energieoutput	GJ ha <sup>-1</sup>	139,39	154,45	153,37	147,9
Energiegewinn	GJ ha <sup>-1</sup>	128,05	143,35	140,85	136,37
Energieintensität	MJ GE <sup>-1</sup>	177,77	159,9	229,01	181,54
Output/Input-Verhältnis		12,3	13,91	12,25	12,82

Tabelle A18: Energiebilanz Pflanzenbau - Untersuchungsbetrieb 2 -

	Einheit	2003	2004	2005	Zusammenfassung der ausgewählten Jahre
Größe	ha	1.422,63	1.406,08	1.414,18	1.414,3
Ackerzahl		48	48	48	48
<b>Energiebindung HP + NP</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>85,05</b>	<b>115,06</b>	<b>109,24</b>	<b>103,06</b>
- Energiebindung Hauptprodukt		80,88	111,92	99,98	97,53
- Energiebindung Nebenprodukt		4,17	3,13	9,27	5,53
<b>Ertrag HP + NP</b>	<b>GE ha<sup>-1</sup></b>	<b>43,76</b>	<b>57,89</b>	<b>56,16</b>	<b>52,58</b>
- Getreideeinheit HP		43,49	57,69	55,56	52,22
- Getreideeinheit NP		0,27	0,2	0,6	0,36
<b>Organische Dünger ges.</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>1,25</b>	<b>2,54</b>	<b>1,94</b>	<b>1,91</b>
- Stalldung		0,09	1,16	0,62	0,62
- Gülle		0,57	0,75	0,55	0,63
- Jauche		0	0,02	0,05	0,03
- sonstige organische Dünger		0,58	0,6	0,72	0,64
<b>Mineraldünger ges.</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>5,25</b>	<b>4,73</b>	<b>5</b>	<b>4,99</b>
- Mineraldünger-N		4,61	4,1	4,41	4,37
- Mineraldünger-P		0,11	0,02	0,06	0,07
- Mineraldünger-K		0,53	0,6	0,53	0,55
<b>Saatgut ges.</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>1,71</b>	<b>1,65</b>	<b>1,64</b>	<b>1,66</b>
- Brennwert		1,21	1,16	1,16	1,18
- Erzeugung		0,5	0,48	0,47	0,48
<b>Pflanzenschutzmittel ges.</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>0,93</b>	<b>1,06</b>	<b>0,95</b>	<b>0,98</b>
- Herbizide		0,8	0,88	0,72	0,8
- Fungizide		0,04	0,12	0,15	0,1
- Insektizide		0,01	0,01	0,01	0,01
- Wachstumsreg.		0,08	0,06	0,08	0,07
<b>Dieselmotorkraftstoff ges.</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>2,37</b>	<b>2,45</b>	<b>2,4</b>	<b>2,41</b>
- Anbau		1,23	1,25	1,13	1,2
- Ernte HP		0,96	1,08	1,12	1,05
- Ernte NP		0,18	0,12	0,16	0,15
<b>Maschinen und Geräte ges.</b>	<b>GJ ha<sup>-1</sup></b>	<b>1,2</b>	<b>1,71</b>	<b>1,23</b>	<b>1,38</b>
- Anbau		0,4	0,48	0,43	0,43
- Ernte HP		0,66	1,14	0,66	0,82
- Ernte NP		0,14	0,1	0,14	0,13
Einsatz fossiler Energie	GJ ha <sup>-1</sup>	11,5	12,99	12,01	12,16
Energieoutput	GJ ha <sup>-1</sup>	83,84	113,9	108,08	101,88
Energiegewinn	GJ ha <sup>-1</sup>	72,34	100,91	96,07	89,72
Energieintensität	MJ GE <sup>-1</sup>	267,7	227,34	216,76	234,79
Output/Input-Verhältnis		7,29	8,77	9	8,38

Tabelle A19: Energiebilanz Grünland - Untersuchungsbetrieb 2 -

	Einheit	2003	2004	2005	Zusammenfassung der ausgewählten Jahre
Größe	ha	276,01	276,01	282,45	278,16
Ackerzahl		43	43	43	43
Energiebindung HP + NP	GJ ha <sup>-1</sup>	78,42	113,26	86,64	92,73
Ertrag HP + NP	GE ha <sup>-1</sup>	26,62	38,45	29,42	31,48
Organische Dünger ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	1,92	2,79	2,02	2,24
Mineraldünger ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	1,35	1,04	1,56	1,32
Saatgut ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	0	0	0	0
Pflanzenschutzmittel ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	0	0	0	0
Dieselmotorkraftstoff ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	1,72	1,46	1,84	1,68
Maschinen und Geräte ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	0,8	0,62	0,58	0,66
Einsatz fossiler Energie	GJ ha <sup>-1</sup>	5,79	5,9	6	5,9
Energieoutput	GJ ha <sup>-1</sup>	78,42	113,26	86,64	92,73
Energiegewinn	GJ ha <sup>-1</sup>	72,63	107,36	80,64	86,83
Energieintensität	MJ GE <sup>-1</sup>	217,44	153,51	204,12	187,4
Output/Input-Verhältnis		13,55	19,19	14,43	15,72

Tabelle A20: Energiebilanz Mais - Untersuchungsbetrieb 2 -

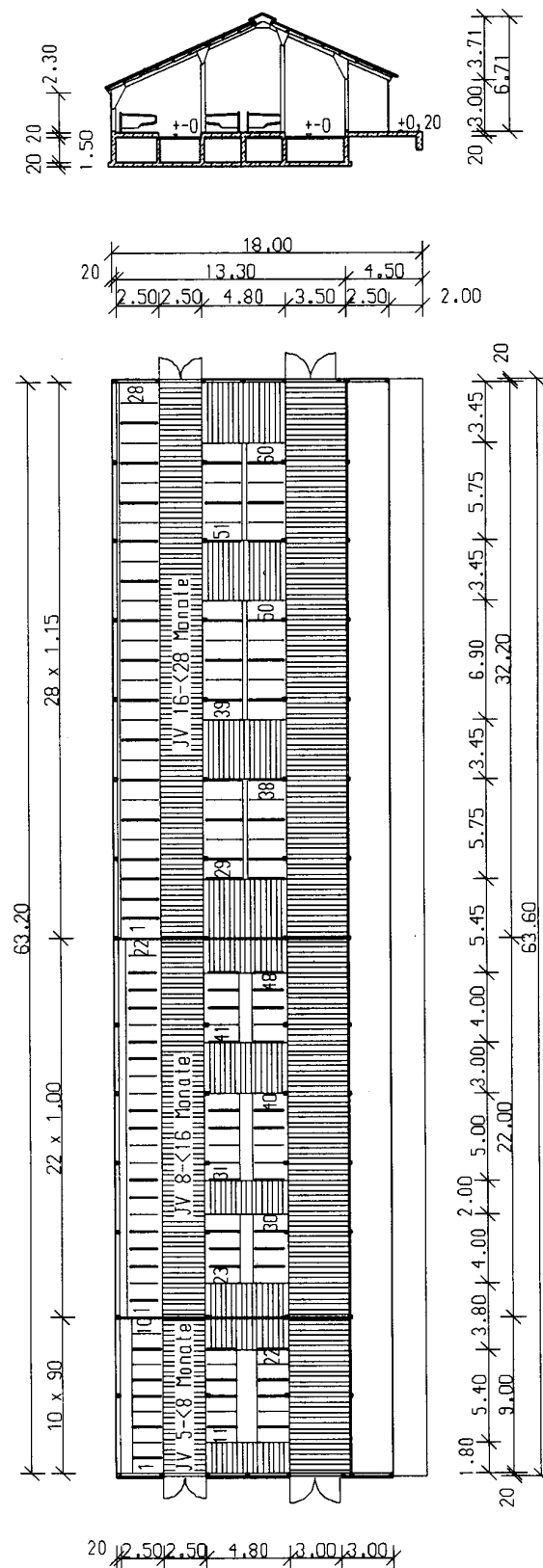
	Einheit	2003	2004	2005	Zusammenfassung der ausgewählten Jahre
Größe	ha	128,75	155,13	142,44	142,11
Ackerzahl		57	44	50	50
Energiebindung HP + NP	GJ ha <sup>-1</sup>	170,02	240,62	166,39	194,5
Ertrag HP + NP	GE ha <sup>-1</sup>	52,8	65,6	51,67	57,08
Organische Dünger ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	5,9	11,56	9,31	9,1
Mineraldünger ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	4,43	4,66	5,04	4,72
Saatgut ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	1,39	1,39	1,39	1,39
Pflanzenschutzmittel ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	1,08	0,34	0,84	0,73
Dieselmotorkraftstoff ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	4,06	4,01	3,44	3,84
Maschinen und Geräte ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	2,45	6,66	2,68	4,06
Einsatz fossiler Energie	GJ ha <sup>-1</sup>	18,58	27,89	21,98	23,1
Energieoutput	GJ ha <sup>-1</sup>	169,28	239,89	165,66	193,76
Energiegewinn	GJ ha <sup>-1</sup>	150,7	212	143,68	170,66
Energieintensität	MJ GE <sup>-1</sup>	355,24	428,42	429,44	408,3
Output/Input-Verhältnis		9,11	8,6	7,54	8,39



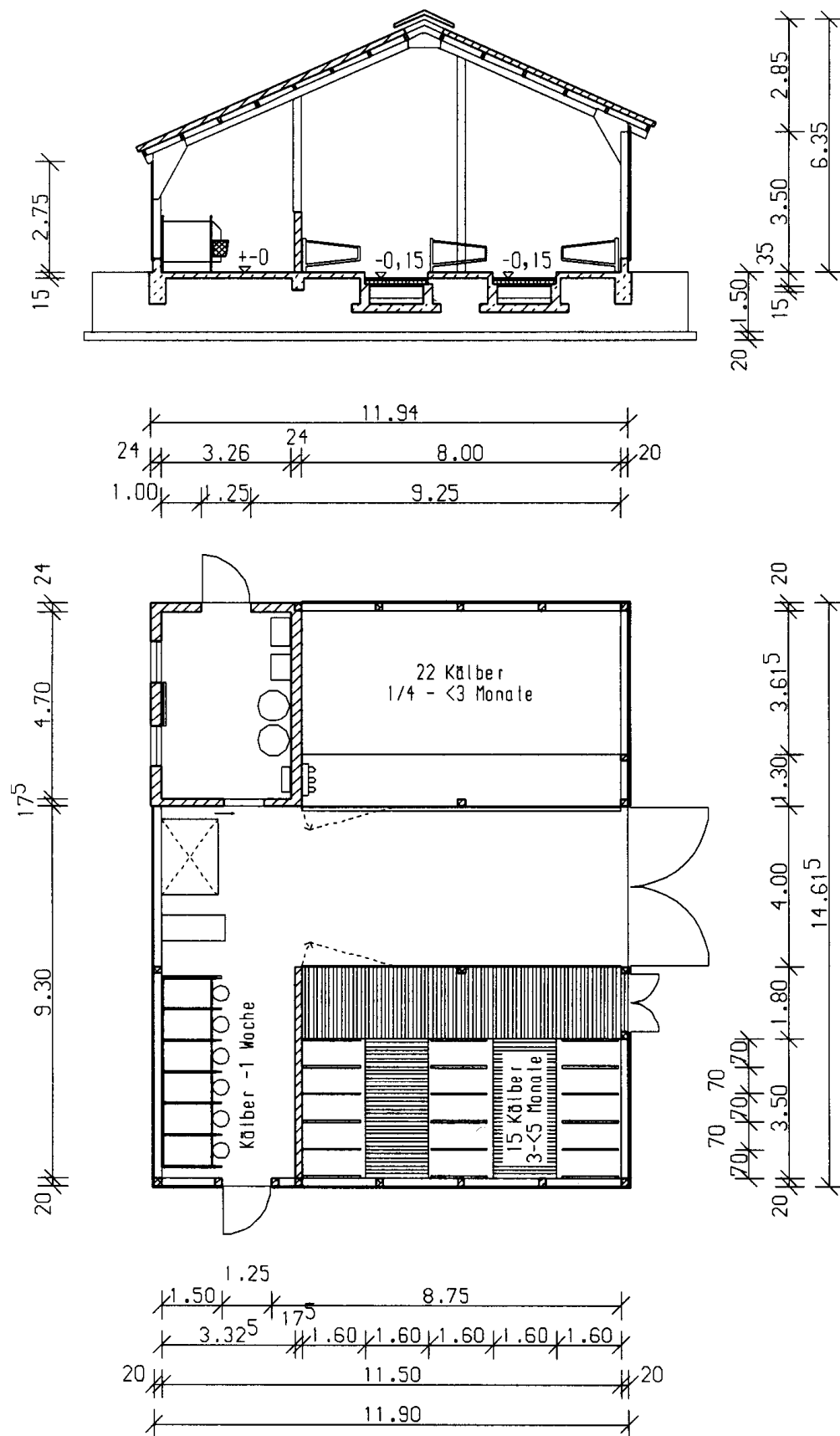
Tabelle A21: Energiebilanz Ackerland - Untersuchungsbetrieb 2 -

	Einheit	2003	2004	2005	Zusammenfassung der ausgewählten Jahre
Größe	ha	1.146,63	1.130,08	1.131,73	1.136,14
Ackerzahl		49	49	49	49
Energiebindung HP + NP	GJ ha <sup>-1</sup>	86,65	115,49	114,88	105,59
Ertrag HP + NP	GE ha <sup>-1</sup>	47,88	62,64	62,84	57,74
Organische Dünger ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	1,09	2,48	1,93	1,83
Mineraldünger ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	6,19	5,63	5,86	5,89
Saatgut ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	2,12	2,05	2,05	2,07
Pflanzenschutzmittel ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	1,15	1,32	1,19	1,22
Diesekraftstoff ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	2,53	2,69	2,54	2,59
Maschinen und Geräte ges.	GJ ha <sup>-1</sup>	1,3	1,98	1,39	1,56
Einsatz fossiler Energie	GJ ha <sup>-1</sup>	12,87	14,72	13,5	13,69
Energieoutput	GJ ha <sup>-1</sup>	85,14	114,05	113,43	104,12
Energiegewinn	GJ ha <sup>-1</sup>	72,27	99,33	99,93	90,43
Energieintensität	MJ GE <sup>-1</sup>	274,57	238,59	218,26	241,23
Output/Input-Verhältnis		6,61	7,75	8,4	7,6

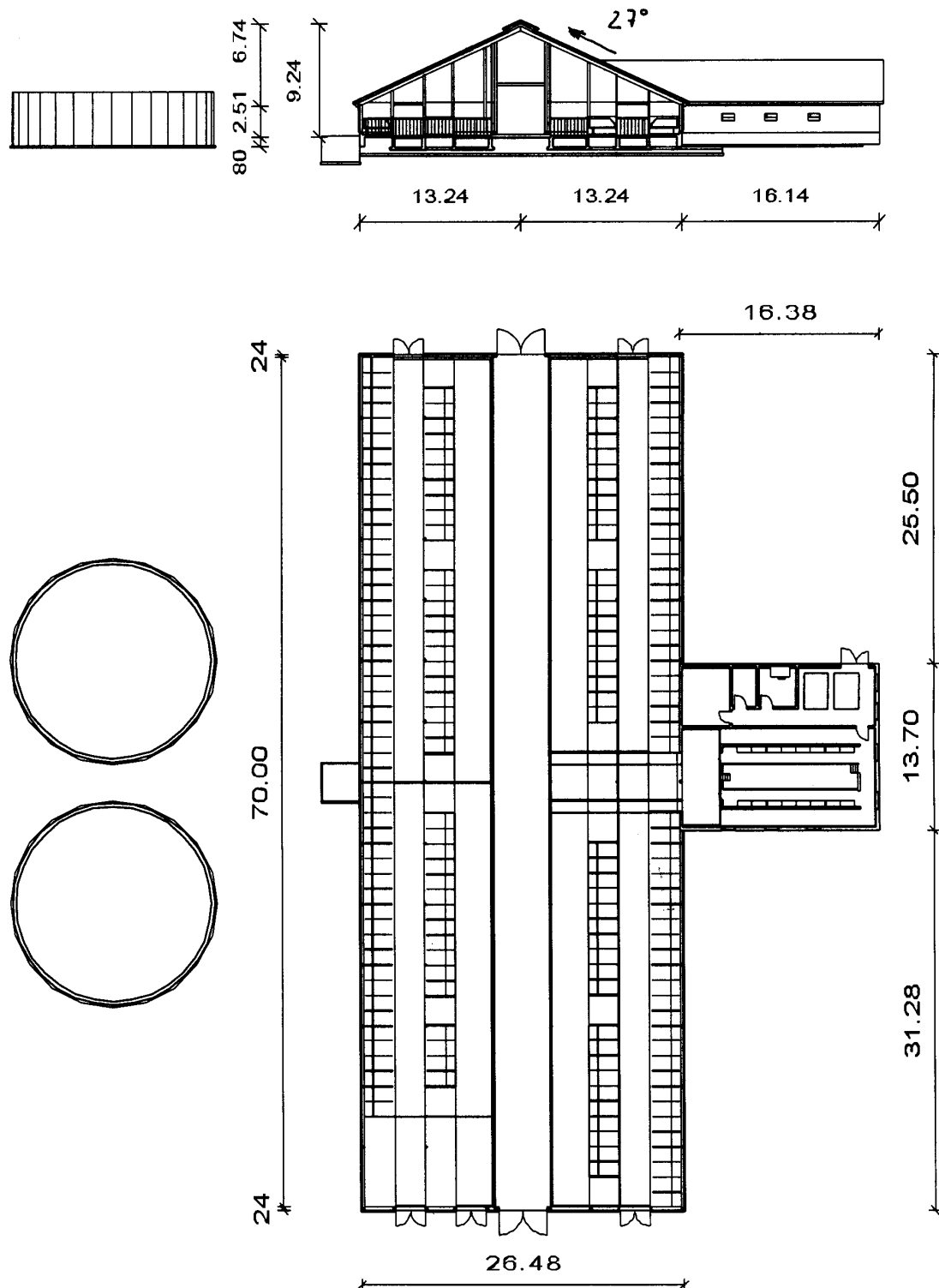
### 10.3 Anhang C - Baupläne



Jungvieh, 132 Stallplätze - Gruppenbucht mit Spaltenboden und Liegeboxen  
(ohne Raufutterlager) [Quelle 9]



Kälber, 43 Stallplätze - Einzelboxen und Gruppenbucht mit Einstreu/-Liegeboxen  
(ohne Raufutterlager) [Quelle 9]



Milchvieh, 188 Stallplätze - Boxenlaufstall, vierreihig (ohne Raufutterlager), Spülkanäle [Quelle 9]

### **Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben.

Potsdam, den 29. September 2008